MODELAÇÃO NUMÉRICA DE ESCOAMENTOS SOBRE DESCARREGADORES EM DEGRAUS

TIAGO MIGUEL GOMES ALMEIDA FARIA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor João Pedro Pêgo

Coorientador: Professor Doutor Rodrigo Jorge Oliveira Maia

OUTUBRO DE 2014

A meus Pais

Live as if you are to die tomorrow, study as if you were to live forever

Desiderius Erasmus

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, o Professor Doutor João Pedro Pêgo, agradeço sobretudo a sua flexibilidade e disponibilidade, como também os incentivos que me reservou. O seu empenho e conselhos foram imprescindíveis para que me mantivesse motivado e lutasse sempre para alcançar um nível superior.

Ao meu co-orientador, Professor Rodrigo Maia, pela imensa confiança no meu trabalho.

Ao Engenheiro Pedro Ramos pela ajuda fulcral na realização desta dissertação através da sua transmissão de conhecimentos, preocupação constante e da leitura desta dissertação. A sua enorme disponibilidade, ajuda e conselhos foram essenciais para solucionar problemas encontrados e continuar constantemente a procurar uma melhor solução.

Aos meus companheiros de casa pela compreensão, amizade e paciência mesmo nos momentos mais stressantes.

Aos meus amigos que com a sua amizade, apoio incondicional, incentivo foram essenciais para tornar todo este percurso não só mais agradável como divertido.

Ao Grupo Local BEST Porto e a todos os seus membros e *alumni*, por me terem ensinado a olhar para a vida de uma perspetiva diferente. Pelas memórias, pelas experiências, pelo divertimento e sobretudo por me transformar numa pessoa muito mais dinâmica, compreensiva e tolerante.

E à minha família, um agradecimento especial, principalmente aos meus Pais, Tios e Avós. Pelos sacrifícios, carinho e apoio incondicional e por tudo o que significam para mim.

RESUMO

O estudo dos escoamentos turbulentos que ocorrem em descarregadores em degraus tem sido um desafio cada vez mais estudado devido à recente popularidade destes descarregadores em barragens.

Esta dissertação centrou-se no estudo, através de modelação numérica, dos diferentes tipos de escoamento turbulento que ocorrem num descarregador em degraus e a análise deste mesmo descarregador para dois tipos de rugosidade. As simulações foram executadas através do *software* de modelação numérica de fluídos, designado de *OpenFOAM*, utilizando o modelo de resolução turbulenta SST k-ω.

Numa primeira fase, foi simulado três tipos de escoamento turbulentos para um descarregador em degraus com uma rugosidade correspondente ao betão liso. Estes escoamentos foram o escoamento em quedas sucessivas, escoamento de transição e escoamento deslizante entre turbilhões.

Numa segunda fase, foi simulado um escoamento para um descarregador cuja superfície representasse a sua construção escavada diretamente da rocha, superfície com macrorugosidades, e para um descarregador que apresentasse uma superfície crivada de microrugosidades.

No final foi efetuado uma análise comparativa entre as variáveis de pressão, altura do escoamento e velocidades, entre os escoamentos simulados.

PALAVRAS-CHAVE: Descarregadores em Degraus, Turbulência, Simulação Numérica de Escoamentos, Rugosidade, *OpenFOAM*

ABSTRACT

The study of turbulent flows that occur in a stepped spillway was been a challenge with increasingly studies due to their recent popularity in the construction of dams.

This dissertation focused in the study, through numerical modelling, of the different kinds of turbulent flows that can occur in a stepped spillway and the comparison of this spillway for two kinds of roughness. The simulations were executed through the computational fluids dynamics software *OpenFOAM* and using the turbulent resolution model SST k-ω.

Firstly, three kinds of different turbulent flows were simulated to a stepped spillway made of smooth concrete. This turbulent flows were the nappe flow, the transition flow and the skimming flow.

Subsequently, it was numerical analyse a flow through a stepped spillway with the presence of macro roughness and another one with the presence of micro roughness in the frontiers.

In the end the pressure, the height of the flow and the velocity were examine and compared between the simulated flows.

KEYWORDS: Stepped Spillway, Turbulence, Computational Fluid Dynamics, roughness, *OpenFoam*

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE QUADROS

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A – Área de entrada do escoamento [m^2]

B – Largura da secção do descarregador [m]

$\overline{C}$ – Concentração média de ar

C_R – Coeficiente de rugosidade

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ – Constantes de ajustamento do modelo *Standard k-*ε

C_μ – Coeficiente de viscosidade dinâmica

d_c – Altura crítica [m]

d_s – Altura do degrau [m]

D – Coeficiente dependente do ângulo do descarregador

D_H – Raio Hidráulico [m]

$E_{\max}$ – Energia máxima do escoamento [m]

ΔE – Diferença de Energia entre montante e jusante [m]

f – Coeficiente de resistência Darcy-Weisbach

f_i – Forças atuantes no corpo na direção i [N]

F – Força [N]

F_i – Força aplicada na direção i [N]

F^* - Número de Froude

g – Aceleração gravítica [m^3/s]

G_k – Geração de energia cinética turbulenta devido ao gradiente da velocidade média [m^2/s^2]

G_b – Geração de energia cinética devido às condições fronteira [m^2/s^2]

h – Altura da água na secção [m]

H_{desc} – Altura do descarregador [m]

i, j – Coordenadas vetoriais

I – Percentagem de intensidade da turbulência

k – Energia cinética turbulenta [m^2/s^2]

K_s – Rugosidade [m]

l – Escala de comprimento da turbulência [m]

l_s – Comprimento do degrau [m]

L_a – Distância entre a zona da formação da camada limite e a secção de início do arejamento [m]

m – Massa do corpo [kg]

$\vec{n}$ – Vetor unitário normal ao elemento de área

p – Pressão [Pa]

$\vec{q}$ – Vetor fluxo de calor [W/m^2]

q_w – Caudal unitário ao longo do descarregador [m$^{3/}$/s]

Q – Caudal do escoamento [m^3/s]

S – Módulo médio da tensão de deformação [Pa]

t – Tempo [s]

T – Temperatura [ºC]

u_i, u_j – Componentes vetoriais da velocidade

$\vec{u}$ – Vetor da velocidade absoluta do fluído

U – Velocidade do escoamento [m/s]

x, y, z – Coordenadas Cartesianas

Y_M – Contribuições da dilatação da turbulência

α_1 – Constante de correção do modelo *k*-ω

β, β^* - Constantes de correção do modelo *k*-ω

δ – Coeficiente de Kronecker

ε – Dissipação de energia turbulenta [m^2/s^3]

Θ – Angulo inclinação do descarregador [graus]

μ - Viscosidade dinâmica [N*s/m^2]

μ_T – Viscosidade turbulenta dos vórtices [N*s/m^2]

ρ – Densidade do fluído [kg/m^3]

σ_ε – Numero de *Prandtl* para o ajustamento de ε

σ_ω, $\sigma_{\omega 1}$, $\sigma_{\omega 2}$ – Número de *Prandtl* para o ajustamento de ω

τ – Tensão tangencial [Pa]

Ω - Magnitude dos vórtices

ω – Taxa de dissipação específica [1/s]

ANN – *Artificial Neural Networks*

CAD – *Computer Aided Design*

CAE – *Computer Aided Engineering*

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

DNS – *Direct Numerical Simulation*

EDT – Escoamento Deslizante de Turbilhões

EQS – Escoamento Quedas Sucessivas

GAMG – *Generalized Geometric-Algeibraic Multi-Grid*

LES – *Large Eddy Simulation*

MEV – Método Elementos Finitos

MDF – Método Diferenças Finitas

MVF - Método Volumes Finitos

PIMPLE – *Pressure Implicit Method for Pressure Linked Equations*

PISO – *Pressure Implicit with Splitting of Operator*

RAM – *Random Access Memory*

RANS – *Reynolds Averaged Navier-Stokes*

RAS – *Reynolds Averaged Simulation*

RPB – Regulamento de Segurança de Pequenas Barragens

SIMPLE – *Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations*

STL - *STereroLithography*

TRA – Escoamento de Transição

1
INTRODUÇÃO

Os descarregadores em degraus têm sido utilizados desde os tempos antigos, mas recentemente têm sido alvo de um aumento da popularidade quando técnicas de construção não convencionais começaram a ser utilizadas na construção de barragens. A exigência de eficácia a baixo custo faz com que o descarregador em degraus seja apelativo. A taxa de dissipação de energia ao ser superior, quando comparado com um descarregador convencional, e pelo facto deste tipo de descarregador possa ser escavado diretamente da rocha torna-o não só economicamente atrativo como também amigo do ambiente.

O objetivo primordial desta dissertação passa pela modelação numérica de um descarregador em degraus, a fim de conseguir compreender melhor o seu comportamento ao longo do descarregador. Para se obter essa compreensão, serão simulados vários escoamentos com caudais distintos, num descarregador de degraus revestido em betão. Assim ter-se-á uma perspetiva dos diferentes comportamentos que o escoamento descreve ao longo deste descarregador não convencional. Como também é prática comum para um descarregador em degraus ser escavado diretamente da rocha, será também comparado o comportamento do escoamento tendo em conta a presença de macrorugosidades e microrugosidades.

Campo de velocidades, pressões e regime de escoamento são alguns dos parâmetros que se pretendem quantificar com a simulação numérica, permitindo, assim, ter noção do comportamento do escoamento e assim contribuir não só para a utilização deste tipo de descarregadores mas também para a utilização de diferentes materiais de revestimento.

Esta dissertação está dividida em seis capítulos distintos, sendo o primeiro de carácter meramente introdutório.

O segundo capítulo é dedicado ao enquadramento teórico dos descarregadores em degraus

O terceiro capítulo incide na modelação numérica de fluídos. É feita uma introdução ao *software* CFD, às equações governativas de escoamentos, aos modelos de turbulência, malhas a utilizar, métodos de resolução numérica entre outras particularidades.

No quarto capítulo é descrito o procedimento seguido na utilização do *software* através da qual se efetuam as simulações numéricas dos escoamentos pretendidos para os diferentes casos de estudo.

No quinto capítulo, são apresentados e discutidos os resultados. As simulações realizadas são analisadas e comparadas entre si.

O capítulo seis consiste numa síntese, conclusão e considerações finais desta dissertação. São apresentadas as conclusões do estudo, assim como sugestões para desenvolvimentos futuros.

2

ENQUADRAMENTO TEÓRICO DE DESCARREGADORES DE CHEIAS

2.1. INTRODUÇÃO AOS DESCARREGADORES DE CHEIAS

Os descarregadores de cheias são estruturas construídas com o objetivo da restituição do escoamento a jusante e do descarregamento de caudais afluentes excessivos aos aproveitamentos hidráulicos, em condições de segurança para a barragem e o leito do rio. Este processo tem de ser efetuado de modo a garantir que o regime do rio se aproxime o mais possível ao seu estado natural, isto é, antes da construção do aproveitamento hidráulico. A construção e dimensionamento dos descarregadores têm de ser efetuados cumprindo sempre as imposições técnicas, de segurança, ambientais e sociológicas das zonas envolventes.

No nº 3 do artigo 15 do Regulamento de Segurança e Barragens, aprovado pelo decreto de lei n.º 344/2007 de 15 de outubro, é possível ler o seguinte: *"Os descarregadores de cheias devem estar aptos a escoar a cheia de projeto em qualquer circunstância, sem necessidade de auxílio das descargas de fundo ou de outros órgãos de exploração."*. Este decreto impõe que um descarregador esteja habilitado a escoar o caudal de cheia para o qual foi projetado, sem ter necessidade de recorrer a dispositivos de descarga como tomadas de águas, descargas de fundo ou outros órgãos. Estes últimos apenas devem ser utilizados na eventualidade de ocorrer uma cheia mais severa do que aquela para a qual o descarregador foi projetado.

No entanto, para além da função regulamentar, é necessário que a descarga seja feita sem pôr em causa a segurança da estrutura da obra hidráulica. É de notar que, devido à construção do aproveitamento hidráulico, a montante deste ocorre uma elevação da altura da água. Isto resulta num desnível entre a superfície de água a montante e a jusante, e consequentemente à ocorrência de uma elevada diferença de carga. O descarregador de cheia, para além de permitir a eficiente descarga de caudais de cheia para que os níveis máximos previstos, a montante da obra hidráulica, não sejam ultrapassados, também deverá permitir reduzir a energia do escoamento. Por vezes a diferença de carga é tão elevada que há a necessidade de recorrer a dissipadores de energia, com o propósito de reduzir o impacto sobre o leito do rio a jusante da barragem. À semelhança do que acontece com os descarregadores, existem vários tipos de dissipadores de energia: trampolim submerso, por jatos e por impacto, entre outros com menor destaque. Porém, é de realçar que estes dissipadores trazem problemas tais como vibrações e fossas de erosão que podem pôr em causa a estabilidade e segurança do aproveitamento.

Vários autores classificam os descarregadores utilizando diferentes critérios. Nesta dissertação será utilizada a classificação de Quintela (1990), que sugere que esta seja feita segundo dois critérios:

- Localização do caudal;
- Guiamento da lâmina líquida e ao modo de dissipação de energia.

No Quadro 1 apresentam-se as características gerais dos diferentes tipos de descarregadores, tendo em conta a classificação de Quintela.

Quadro 1 - Características dos tipos de descarregadores Fonte: adaptado de Quintela (1990)

Critério	Classificação	Aplicabilidade	Controlo do Escoamento
(A) Localização e controlo do escoamento	A.1. Sobre a Barragem	Barragens de Betão	Descarga livre, por sifão ou controlada por comporta
		Barragens de Aterro (descarregadores não convencionais)	Descarga Livre
	A.2. Orifícios através da Barragem	Barragens de Betão	Descarga controlada por comporta
	A.3. Canal de Encosta	Barragem de qualquer tipo. Independentemente da estrutura da barragem	Descarga livre ou controlada por comportas
	A.4. Poço, vertical ou inclinado	Barragem de terra ou enrocamento (poço, seguido de galeria sob a barragem) Barragem de qualquer tipo (galeria escavada)	Descarga livre ou controlada por comportas
	A.5 Fusível	Qualquer Barragem (de emergência, lateral à barragem)	Descarga livre
(B) Guiamento da lâmina líquida e dissipação	B.1. Queda livre e dissipação de energia no leito	Com e sem proteção do leito, com e sem sobrelevação do nível natural do rio. Localização e controlo segundo A.1 e A.2	
	B.2 Queda guiada e trampolim de saída com dissipação no leito	Com e sem proteção do leito, com ou sem sobrelevação do nível natural do rio. Localização e controlo segundo A.1, A.2, A.3 e A.4	
	B.3 Queda guiada e obra de dissipação de energia	Localização e controlo segundo A.1, A.2, A.3 e A.4	

Os descarregadores sobre a barragem (A.1) são praticamente exclusivos das barragens de betão ou alvenaria de pedra. Segundo Pinheiro (2007), nas barragens de aterro, devido à sua deformabilidade e aos seus problemas de percolação, a construção de obras de betão acarreta vários problemas e dificuldades. Os descarregadores sobre a barragem podem ser controlados por comportas ou a descarga pode efetuar-se livremente. O guiamento da lâmina líquida neste descarregador pode ser feito com um escoamento em canal, parcialmente ou totalmente apoiado sobre a barragem, até a um trampolim ou uma estrutura de dissipação de energia. A Figura 2.1 representa o exemplo de uma barragem com um descarregador sobre a barragem com queda guiada.

Figura 2.1 - Barragem do Picote. Fonte: INAG (2014)

O descarregador por orifícios (A.2) é aplicado apenas em barragens de betão, independentemente do tipo, e apesar de não ser obrigatório, devem ser controlados por comportas (Pinheiro (2007)). Neste tipo de descarregador, os jatos provenientes dos orifícios podem atingir o leito próximo da barragem ou uma zona mais a jusante. Caso o primeiro caso ocorra, para que não haja erosões no leito do rio que coloquem em perigo a segurança e estabilidade da barragem, é necessário considerar algumas disposições construtivas tais como a construção de um pequeno açude. O açude aumenta o nível de água a jusante amortizando o impacto do escoamento e assim evitando as erosões do leito do rio a jusante.

No caso do descarregador por canal de encosta (A.3), é aplicável a todo o tipo de barragens e é constituído por um canal de secção retangular, podendo a soleira ser em degraus. Normalmente este tipo de descarregador encontra-se nas margens do aproveitamento hidráulico e pode ser controlado por comportas.

O descarregador em poço (A.4) é usado tipicamente em barragens de aterro. Este possui a grande vantagem de permitir o aproveitamento de condutas ou túneis, que, em primeira fase da obra, foram utilizados como desvio provisório. Por questões de segurança, o escoamento na galeria ou no túnel do descarregador em poço é efetuado em superfície livre, evitando assim o ressalto hidráulico contra a abóboda e a elevada pressão nas paredes do túnel.

Em relação ao descarregador de fusíveis (A.5), normalmente é utilizado como descarregador de emergência, como complemento do descarregador principal, ou seja, funcionando apenas em ocasiões em que a cheia afluente atinja valores que podem pôr em perigo a barragem ou outras obras anexas.

Por fim, existem os descarregadores não convencionais, que têm como objetivo principal a dissipação de energia ao longo do seu canal. É necessário realçar que o tipo de descarregador a adotar está dependente de vários critérios e fatores. Segundo Quintela (1990), estes são: a fiabilidade da solução, o

tipo de barragem e os órgãos constituintes desta, a topografia, as condições hidrológicas, as características geotécnicas do terreno, o ciclo hidrológico do curso de água, o caudal a descarregar e as condicionantes devido à presença de equipamentos hidromecânicos. É também importante considerar o impacto económico que cada vez mais tem sido um fator relevante para a escolha dos descarregadores. Os custos associados à construção de um descarregador conseguem ser bastante significativos no custo total da obra. Para fazer face a estes e às problemáticas que ocorrem frequentemente nas barragens, opta-se cada vez mais pela utilização de descarregadores não convencionais, em vez das soluções clássicas.

2.2. DESCARREGADORES NÃO CONVENCIONAIS

Nos últimos anos, tem vindo a desenvolver-se o interesse pelos chamados descarregadores não convencionais com o objetivo de minimizar o custo das obras de dissipação, e das dificuldades construtivas de estruturas de dissipação nas barragens de aterro. Estas dificuldades construtivas provêm de vários fatores. Os múltiplos assentamentos diferenciais que estas barragens estão sujeitas ao longo da sua vida (o que provoca a instabilidade da estrutura e do seu descarregador), a suscetibilidade das barragens de aterro à ocorrência de erosão e a fraca resistência dos aterros a cargas concentradas são alguns exemplos.

Segundo Relvas, Pinheiro (1998), a nível financeiro, os descarregadores não convencionais conseguem reduzir o custo da solução projetada em 50% a 60% e também implicam um menor impacto ambiental. As razões para estas reduções recaem no facto deste tipo de descarregadores ter uma menor necessidade de ocupação de espaço e dissipar grande parte da energia do escoamento na própria soleira descarregadora, diminuindo assim a necessidade de construção de uma bacia de dissipação.

Devido à existência de vários conceitos gerais subjacentes aos descarregadores não convencionais, houve a necessidade que uma entidade regesse estes mesmos descarregadores. Assim em ICOLD (1994) sugeriu-se que o estudo dos descarregadores não convencionais se regesse por duas linhas fundamentais:

- Utilização de túneis ou canais com soleira não revestida, apresentando rugosidade elevada;
- Construção de descarregadores em degraus.

Quanto à localização dos descarregadores não convencionais, grande parte dos estudos atuais focam-se na possibilidade da sua construção no corpo da barragem, devido às vantagens a nível económico e à redução do comprimento da obra.

No entanto, em Portugal, o Regulamento de Segurança de Pequenas Barragens (RPB), regulamento aplicado a barragens com altura igual ou inferior a 15m e com capacidade inferior a 100.000 m^3, aprovado pelo Decreto-Lei 409/93 a 14 de Dezembro de 1993, afirma que não é possível a construção deste tipo de descarregadores no corpo da barragem. Tal pode-se comprovar no artigo 10º, ponto 4: "*O descarregador não pode ficar fundado no corpo da barragem*".

Esta restrição tem como objetivo evitar os problemas associados à construção destes descarregadores sobre uma fundação erodível e com grande deformabilidade, características típicas, tal como já referido, de barragens de aterro.

Pelas razões apresentadas os descarregadores não convencionais, em Portugal, continuam a ser construídos, na sua maioria, por canais laterais a céu aberto implantados numa das vertentes.

É possível distinguir 4 tipos de descarregadores não convencionais:

- Descarregadores em betão armado moldado *in situ* (BCC);
- Descarregador de gabiões com soleira em degraus;

- Descarregadores de blocos de betão prefabricado com soleira em degraus;
- Descarregador sobre terra armada

2.2.1. Descarregadores de cheias não convencionais em degraus

Os descarregadores de cheias em degraus têm sido usados desde as civilizações mais remotas. De acordo com Knauss (1995), presume-se que o descarregador em degraus mais antigo se situe na Arkanania, Grécia, contruído por volta de 1.300 A.C. Mais recentemente devido às novas técnicas de construção e aos novos materiais este tipo específico de descarregador não convencional voltou a ser novamente utilizado nas barragens.

Tal como foi referido anteriormente existem 2 tipos de descarregador em degraus: descarregador com blocos de betão prefabricados (Figura 2.2) e o descarregador de gabiões (Figura 2.3). Ambos os descarregadores são estruturalmente semelhantes, apenas com a diferença, tal como o próprio nome indica, no material que é utilizado para o revestimento dos degraus. Ambos os descarregadores são constituídos por uma soleira descarregadora, um canal com soleira em degraus e uma estrutura de dissipação de energia, no caso de esta última ser necessária, no entanto, o descarregador revestido a betão apresenta uma superfície lisa ao longo da sua soleira enquanto o de gabiões apresenta uma soleira acidentada revestida de macrorugosidades.
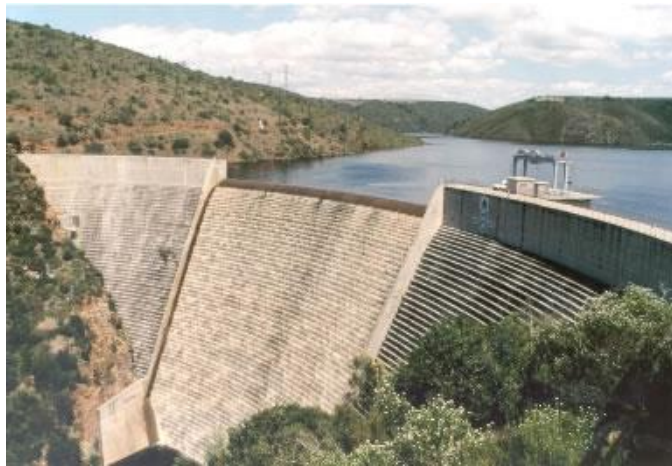
Figura 2.2 - Descarregador de degraus em betão, Barragem Wolwedans, Africa do Sul. Fonte: CHINCOLD (2010)

Apesar da relevância prática e das possibilidades enormes que a macrorugosidade em descarregadores em degraus apresentam, segundo Gonzalez *et al* (2005), ainda muito pouco se sabe sobre as propriedades dos escoamentos e o seu comportamento em descarregadores em degraus com macrorugosidades. De acordo com Salsami *et al* (2012), os descarregadores em gabiões são usados frequentemente em pequenas barragens, trabalhos de conservação do solo, paredes de retenção de águas e em bastantes outros trabalhos variados da engenharia hidráulica. As estruturas de gabiões são estáveis e flexíveis e bastante fáceis de construir, reduzindo assim substancialmente os custos da obra. A porosidade dos gabiões ajuda a drenar a água e a reduzir a carga de água por trás da estrutura. Gonzalez, Chanson (2006) afirmam que devido à reavaliação que algumas barragens convencionais e de aterro têm sido alvo ao longo dos últimos anos, verificou-se que em grande parte das barragens, principalmente as de aterro, o caudal escoado é por vezes superior àquele que o descarregador foi dimensionado e, por isso, estão em perigo de rotura. Os descarregadores em degraus de gabiões integram neste caso uma solução eficaz pois além dos reduzidos custos e da capacidade de drenagem de água conseguem, segundo Andre *et al*

(2004), Gonzalez, Chanson (2006); Salsami *et al* (2012) entre outros, uma dissipação de energia bastante superior ao descarregador de degraus em betão. É necessário realçar, no entanto, que este tipo de descarregador, em gabiões, é bastante limitado na capacidade de escoamento. A sua utilização não é recomendada para escoamentos com uma velocidade superior a 4 m/s devido ao risco de erosão e transporte dos gabiões. Daí que a sua utilização seja bastante limitada a barragens de pequenas dimensões e barragens de aterro.

Figura 2.3 - Descarregador de degraus em gabiões, Austrália. Autor: Tony Marszalek

O estudo de escoamentos de descarregadores em degraus revela-se, por vezes, uma missão de elevada complexidade. As principais dificuldades de estudo recaem essencialmente nos diferentes regimes de escoamentos que se fazem sentir ao longo do descarregador, na turbulência bastante forte e na sua interação com o descarregador e do forte arejamento do escoamento. (Chanson, Toombes (2002a), Chanson, Toombes (2002b), Yasuda, Chanson (2003))

Independentemente destas dificuldades, os descarregadores em degraus, comparativamente aos outros tipos, continuam, tal como já referido, a apresentar enormes vantagens. Por este motivo nas últimas três décadas o estudo e a investigação deste típico específico de descarregadores tenha aumentado.

2.2.2. Regimes de escoamento em descarregadores em degraus

O regime de escoamento que ocorre num descarregador de degraus depende do caudal descarregado e da geometria dos degraus. Com o objetivo de definir as suas características e otimizar o comprimento dos degraus foram efetuados vários estudos de onde se acabou por considerar diferentes tipos de escoamento.

Atualmente são aceites 3 diferentes tipos de escoamento em descarregadores em degraus:

- Escoamentos em quedas sucessivas – EQS (*nappe flow*)
- Escoamento de transição – TRA (*transition flow*)
- Escoamento deslizante sobre turbilhões – EDT (*skimming flow*)
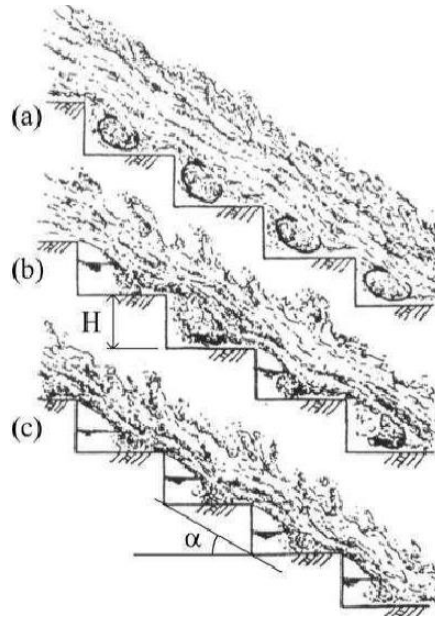
Figura 2.4 - Tipos de escoamento sobre descarregadores em degraus: a) deslizante sobre turbilhões; b) Transição c) quedas sucessivas. Fonte: Dai Prá (2004)

2.2.2.1. Escoamento em quedas sucessivas (*Nappe Flow*)

O escoamento em quedas sucessivas é caracterizado pela formação em cada degrau de uma lâmina líquida, que atinge parcialmente ou totalmente o degrau seguinte. Sob esta lâmina verifica-se, na maior parte das vezes, a formação de uma bolsa de ar. Este escoamento está normalmente associado a caudais reduzidos e declives pequenos.

Com base em estudos de autores como Essery, Horner (1978); Peyras *et al* (1991) e Matos, Quintela (1997) é possível subdividir este tipo de escoamento em três diferentes subtipos:

- Escoamento em quedas sucessivas com impacto total do jato, com a formação do ressalto hidráulico na soleira do degrau *(isolated nappe flow with fully developed hydraulic jump);*
- Escoamento em quedas sucessivas, com impacto total do jato, sem formação de ressalto hidráulico na soleira do degrau *(isolated nappe flow with partially developed hydraulic jump);*
- Escoamento em quedas sucessivas, com impacto parcial do jato na soleira do degrau (*partial nappe flow ou nappe interference flo*w que pode ser designado também, segundo Chanson (2002), de *nappe flow without hydraulic jump*);

No escoamento em quedas sucessivas, visto que os caudais são baixos, a dissipação de energia pode ser feita por três diferentes processos: através da fragmentação do jato no ar, através do impacto do jato no degrau e através da formação de um ressalto hidráulico.
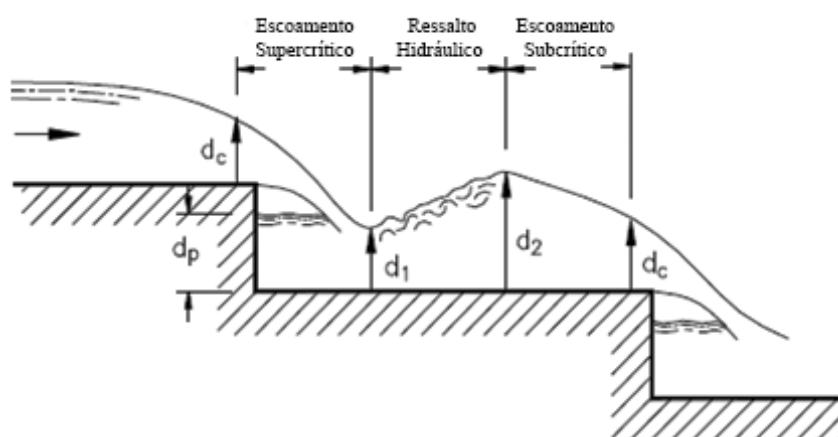
Figura 2.5 - Escoamento em quedas sucessivas com impacto total do jato, com formação do ressalto hidráulico na soleira do degrau. Fonte: adaptado de Matos (1999)
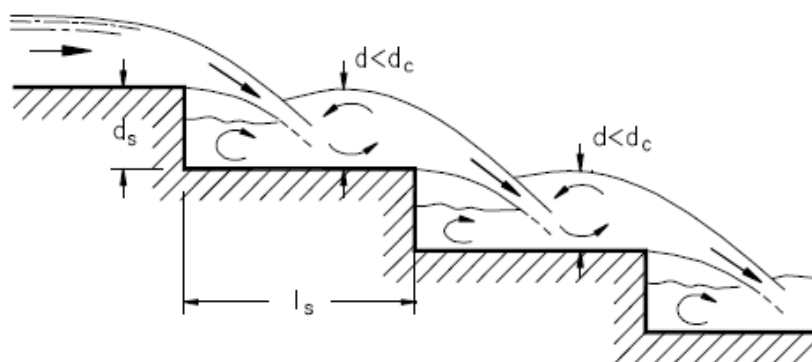
Figura 2.6 - Escoamento em quedas sucessivas com impacto total do jato, sem formação de ressalto hidráulico na soleira do degrau. Fonte: adaptado de Matos (1999)
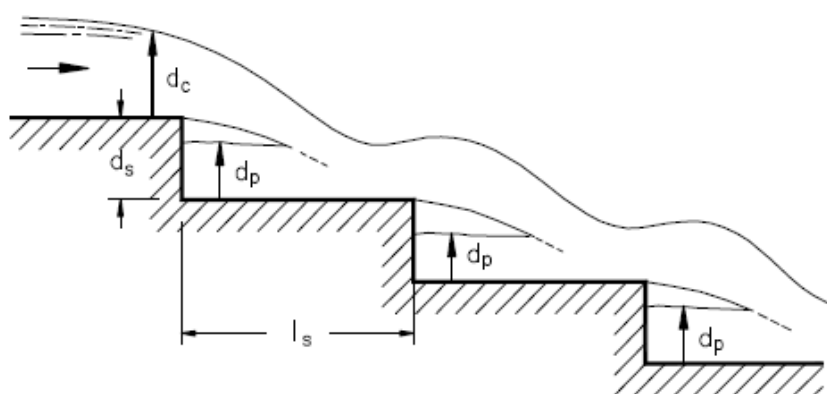
Figura 2.7 - Escoamento em quedas sucessivas com impacto parcial do jato na soleira do degrau. Fonte: adaptado de Matos (1999)

Chanson (1994) de modo a definir o limite de ocorrência de escoamento em quedas sucessivas com formação de ressalto hidráulico num descarregador de degraus propôs a expressão 2.1:

$$\frac{d_c}{d_s} = 0.0916 * \left(\frac{d_s}{l_s}\right)^{-1.276} \qquad (2.1)$$

Fael, Pinheiro (2003) propõem também a expressão 2.2 para a ocorrência do escoamento em quedas sucessivas com impacto total do jato:

$$\frac{d_c}{d_s} = 0.125 * \left(\frac{d_s}{l_s}\right)^{-1.313} \qquad (2.2)$$

Onde d_s é a altura do degrau, d_c a altura crítica do escoamento na secção e l_s o comprimento do degrau.

2.2.2.2. Escoamento de Transição (*Transition Flow*)

Até aos anos 90, o escoamento de transição não era considerado, existia uma transição direta do escoamento em quedas sucessivas para um escoamento deslizante em turbilhões.

De acordo com Chanson (2002), começou a haver a necessidade de definir o escoamento de transição devido às características instáveis deste tipo de escoamento. Ainda segundo este mesmo autor, flutuações de pressões e esforços adicionais aplicados à estrutura são exemplos desse tipo de características, que foram a causa de acidentes nas barragens de Arizona Canal em 1905 e New Croton em 1995, devido ao seu funcionamento ser em regime de transição.

Apesar de alguns autores estabelecerem umas primeiras noções de escoamentos de transição para colmatar essa falha existente (Essery, Horner (1975); Elviro, Mateos (1995)), só com Otshu, Yasuda (1997 a,b) é que realmente foi definido e delimitado a noção de escoamento de transição. No entanto estes autores não definiram as propriedades do escoamento. Chamanani, Raharatnam (1999); Andre, Ramos (2003); Chanson, Toombes (2002a, 2004); Meireles (2004); Renna (2004) dedicaram-se ao estudo do escoamento de transição. Estabeleceram conceitos e determinaram as condições do fim do escoamento em quedas sucessivas, do início e fim do escoamento de transição e do início do escoamento sobre turbilhões. Ainda não existe uma consensualidade quanto a estas fronteiras, apesar de existirem alguns pontos onde vários autores estão em concordância. Matos (1999); Yasuda *et al*. (2001); Andre *et al*. (2001) e Boes, Hager (2003) consideram que o escoamento de transição ocorre, quando nos primeiros degraus não se verifica a existência de cavidades de ar, porém estas são visíveis nos restantes degraus. Neste escoamento caótico é comum a existência de salpicos intensos na superfície livre, tal como observado por Chanson, Toombes (1994).

Matos (1999); Yasuda *et al* (2001) entre outros propuseram equações para definir este regime de escoamento e os seus limites, no entanto, tal como dito anteriormente, estas não são consensuais. Nos estudos mais recentes, é utilizada com bastante frequência a equação proposta por Chanson, Toombes (2004) onde se enquadra o limite superior e inferior do escoamento através das equações 2.3 e 2.4, respetivamente:

$$\frac{d_c}{h} > 0.9174 - 0.381 * \frac{h}{l_s} \qquad \text{Limite inferior} \left[0 < \frac{h}{l_s} < 1.7\right] \qquad (2.3)$$

$$\frac{d_c}{h} < \frac{0.9821}{\left(\frac{h}{l_s} + 0.388\right)^{0.384}} \qquad \text{Limite inferior} \left[0 < \frac{h}{l_s} < 1.5\right] \tag{2.4}$$

Onde a variável d_c representa a altura crítica do escoamento, h a altura da água registada e l_s representa a largura do degrau.

Ainda segundo estes mesmos autores, é possível dividir este escoamento em dois tipos específicos:

- **TRA1:** Para pequenas descargas de caudal, onde cavidades de ar de tamanho variável ocorrem de forma irregular a jusante do ponto de arejamento;
- **TRA2:** Ocorrência de diferentes tamanhos de cavidades de ar alternadas por vórtices totalmente preenchidos de água nos degraus a jusante do ponto de arejamento.
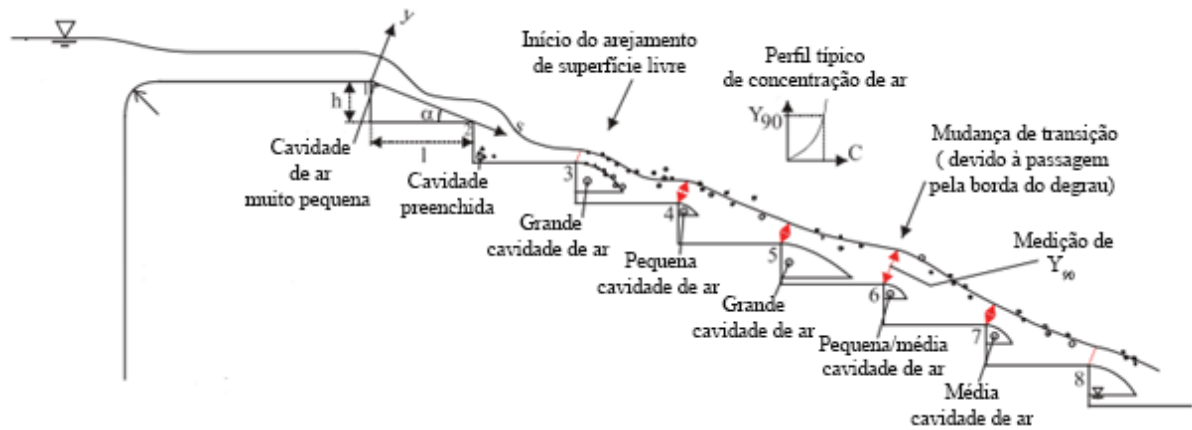
Figura 2.8 - Escoamento de Transição do tipo TRA1. Fonte: adaptado de Chanson, Toombes (2004)
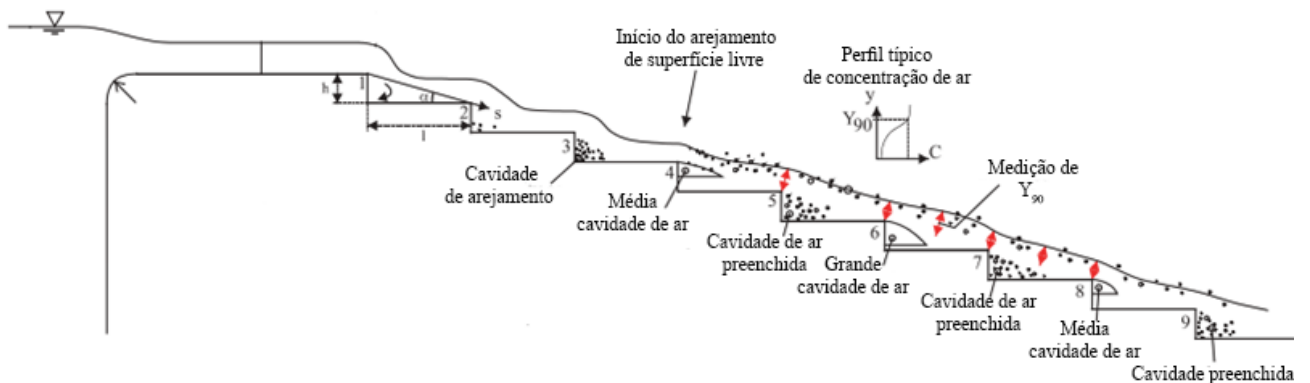
Figura 2.9 - Escoamento de Transição do Tipo TRA2. Fonte: adaptado de Chanson, Toombes (2004)

2.2.2.3. Escoamento deslizante sobre turbilhões (*Skimming Flow*)

No escoamento deslizante é possível verificar que este apresenta dois tipos distintos de escoamento: o escoamento principal e o escoamento secundário. O escoamento principal ocorre sobre a soleira fictícia do canal, também designado de pseudofundo, sendo esta zona definida pela envolvente dos degraus. O escoamento secundário é o escoamento que se verifica no interior da cavidade delimitada pelo escoamento principal e degraus.

Este tipo de escoamento ocorre principalmente para caudais elevados e segundo Chanson (1994, 2002) e Matos (1999) pode dividir-se e 3 subtipos:

- Escoamento com recirculação instável e com interferência esteira - degrau (*wake-step interference*);
- Escoamento com circulação instável e com interferência esteira – esteira (*wake-wake interference*);
- Escoamento com recirculação estável (*recirculanting cavity flow*).

Figura 2.10 - Escoamento com recirculação instável e com uma interferência esteira – degrau
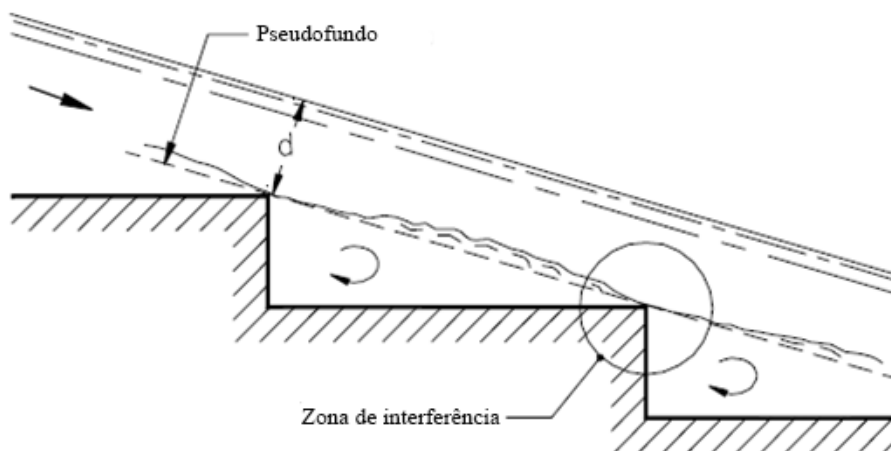
Figura 2.11 - Escoamento com recirculação instável e com uma interferência degrau – degrau
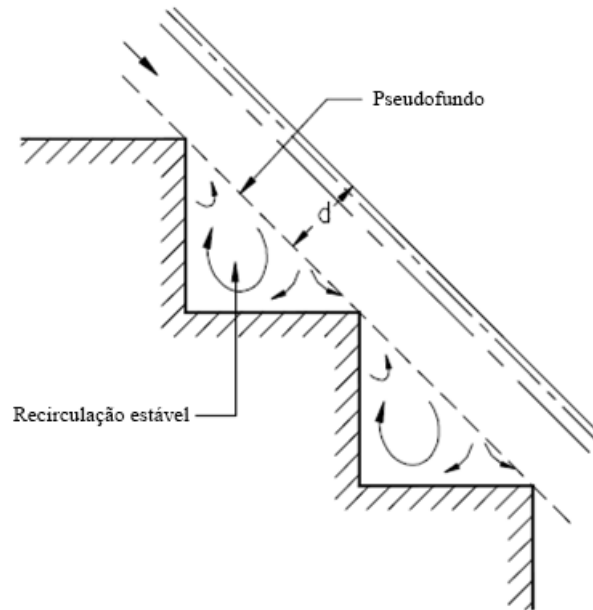
Figura 2.12 - Escoamento com recirculação estável

A ocorrência, destes diferentes escoamentos, está relacionada com a geometria dos degraus. Se estes apresentarem inclinações pequenas e um comprimento elevado, verifica-se um escoamento com recirculação instável e com interferência esteira – degrau (*wake-step interference*). Caso os degraus sejam muito inclinados ocorre um escoamento com recirculação estável (*recirculating cavity flow*).

Nos escoamentos deslizantes sobre turbilhões, a energia é dissipada sobretudo através dos vórtices de recirculação desenvolvidos nas cavidades existentes nos degraus. Estes vórtices são mantidos devido à tensão tangencial do escoamento adjacente, de acordo com Rajaratman (1990).

Chanson (2002) após ter em conta com a existência do regime de transição propôs a seguinte formula para o limite do escoamento deslizante de turbilhões:

$$\frac{d_c}{d_s} = 1.2 - 0.325 * \frac{d_s}{l_s} \qquad (2.5)$$

Já Otshu *et al*. (2004) afirma que as condições de escoamento de turbilhões varia com a inclinação do canal (θ) e propõe a equação 2.6 para a definição do limite do escoamento de turbilhões:

$$\frac{d_s}{d_c} = \frac{7}{6} * (\tan\theta)^{1/6} \qquad 5.7º \leq \theta \leq 55º \qquad (2.6)$$

Na Figura 2.13 é possível observar as previsões de diferentes autores para o começo e fim das diferentes fases de regime de escoamento nos descarregadores em degraus. Sendo SK1 correspondente ao escoamento com recirculação instável com interferência esteira-degrau e SK2 com interferência degrau-degrau.
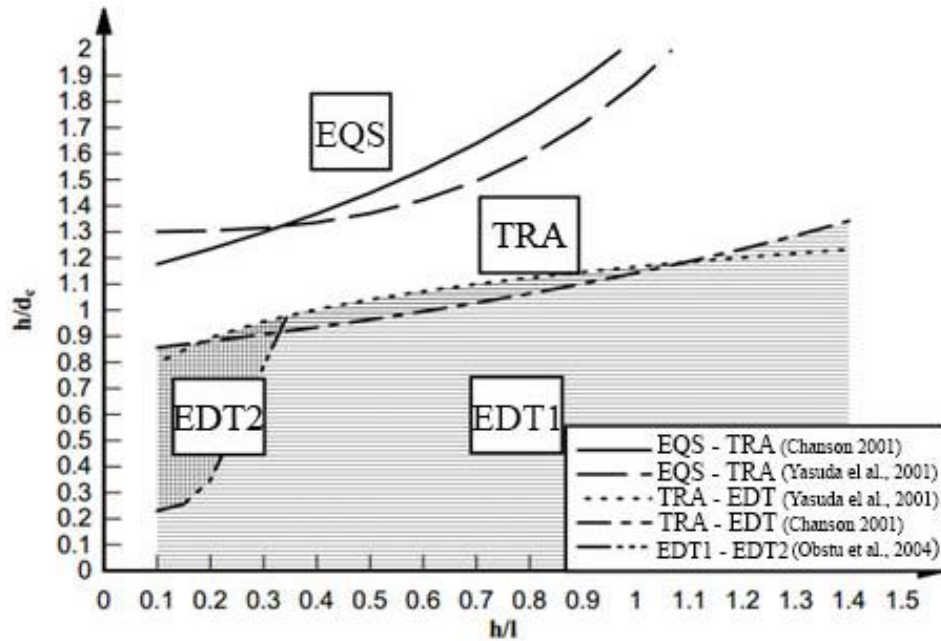
Figura 2.13 - Ilustração das diferentes fases de escoamento. Fonte: adaptado de Gonzalez and Chanson (2007)

2.2.3. Arejamento do escoamento em descarregadores em degraus

Segundo Tozzi (1992), o arejamento de um escoamento é um fenómeno bastante comum em descarregadores e caracteriza-se pela incorporação do ar no escoamento devido ao fenómeno de emersão. No início do arejamento, o escoamento adquire características de turbulência, no entanto tem tendência após isso a adquirir uma altura, velocidade média, pressões atuantes e quantidade de ar constantes (Tozzi (1992) e Sanagiotto (2003)).

O estudo do arejamento é bastante relevante nos descarregadores em degraus. O conhecimento do ponto de início do arejamento no escoamento, local onde a camada limite atinge a superfície dando início ao arejamento do escoamento, é de máxima importância. É a partir deste ponto, também designado por alguns autores como ponto crítico, que ocorre um aumento da altura de água ao longo do descarregador, influenciando assim o dimensionamento das paredes laterais e também o conhecimento do risco da ocorrência de cavitação dos degraus.

A nível de arejamento, ou emulsionamento de ar do escoamento consegue-se identificar várias fases: A região do escoamento sem emulsionamento de ar, o ponto de início de arejamento e a região de escoamento com emulsionamento de ar. Segundo Matos (1999) esta última divide-se em 3 subfases distintas:

- Escoamento com emulsionamento de ar parcialmente desenvolvido;
- Escoamento com emulsionamento de ar completamente desenvolvido;
- Escoamento uniforme.
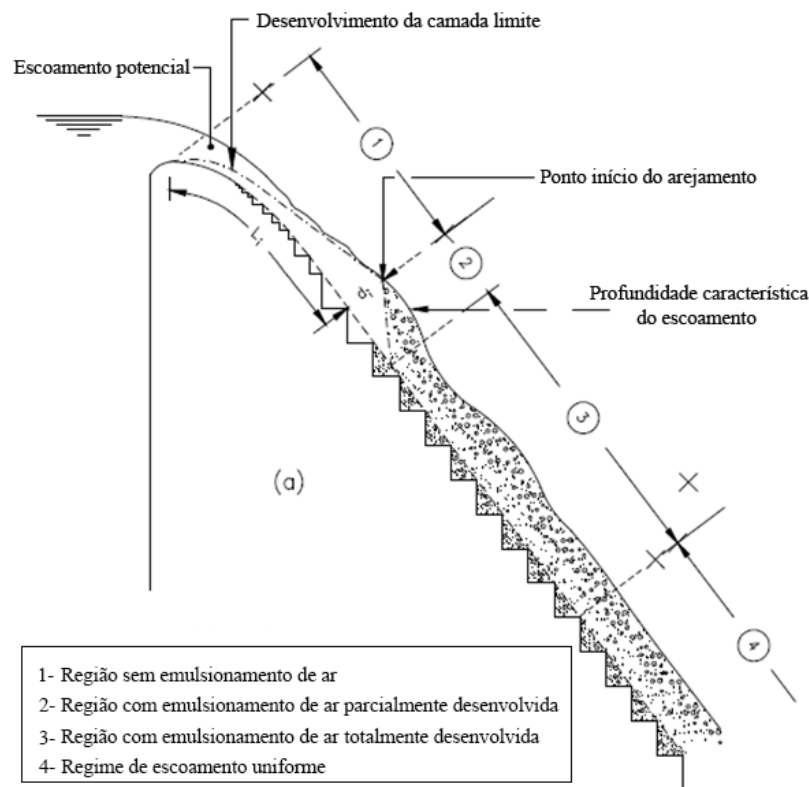
Figura 2.14 - Diferentes fases do emulsionamento de ar num escoamento sobre um descarregador em degraus. Fonte: adaptado de Matos (1999)

2.2.3.1. Escoamento sem emulsionamento de ar

Segundo Meireles (2011), os estudos relativos ao escoamento sem emulsionamento de ar ainda são bastante escassos. Alguns estudos foram efetuados por Chanson (2004), que incluiu uma análise do escoamento sem emulsionamento de ar, com metodologias a serem aplicadas nesta parte do escoamento. Andre, Ramos (2003) adquiriram dados de um descarregador em degraus de uma barragem de aterro e Meireles *et al*. (2006) apresentou também alguns dados sobre esta fase do escoamento num descarregador em degraus com uma inclinação bastante acentuada. Todos estes estudos nesta área foram bastante superficiais, não se analisando os dados com pormenor. O único estudo considerado relevante, por Meireles (2011), até aos dias de hoje foi o de Amador *et al*. (2006) que efetuou uma análise pormenorizada do escoamento sem emulsionamento de ar num descarregador em degraus. Este autor focou-se sobretudo nas características do escoamento em relação à dissipação de energia, turbulência e espessura da camada superficial. No entanto este estudo é limitado a apenas uma única descarga não sendo útil para descargas continuas, logo o seu campo de aplicação é bastante reduzido.

2.2.3.2. Ponto Crítico ou Ponto de Início do Arejamento

O ponto crítico ou o ponto de início do arejamento é o ponto em que a espessura da camada limite coincide com a altura do escoamento. A partir deste ponto o escoamento apresenta uma superfície bastante irregular devido à entrada do ar. O ponto crítico num descarregador em degraus tende a ser mais a montante em comparação a um descarregador de soleira lisa, devido à turbulência que se origina

nos degraus, o que provoca alturas de água superiores e como consequência uma intersecção entre as duas superfícies mais a montante.

Nos descarregadores em degraus, o ponto crítico tem sido identificado principalmente por observação visual, tanto em modelos experimentais como em protótipos, por autores como Tozzi (1992), Bindo *et al* (1993), Chanson, Toombes (2002a), Yasuda, Chanson (2003), Amador *et al* (2009) entre outros.

Alguns autores como Matos (1999), Gonzalez, Chanson (2005) e Amador *et al* (2009) sugeriram, através de medições experimentais, equações para a previsão de posições do início do ponto crítico e profundidade de escoamento nesse ponto (equações 2.7, 2.8 e 2.9 respetivamente) e designaram o ponto crítico como a intersecção entre o da camada limite e do perfil do escoamento.

$$\frac{L_a}{d_s * \cos\theta} = 6.289 * \left(F^*\right)^{0.734} \qquad (2.7)$$

$$\frac{L_a}{d_s * \cos\theta} = 9.8 * \left(\sin\theta\right)^{0.08} * \left(F^*\right)^{0.71} \qquad (2.8)$$

$$\frac{L_a}{d_s * \cos\theta} = 5.982 * \left(F^*\right)^{0.84} \qquad (2.9)$$

Onde o número de *Froude*, F^* se consegue obter através da expressão 2.10.

$$F^* = \frac{q_w}{\sqrt{g * \sin\theta * \left(d_s * \cos\theta\right)^3}} \qquad (2.10)$$

Onde q_w representa o caudal unitário ao longo do descarregador. L_a a distância entre a zona da formação da camada limite e a secção de início do arejamento tal como se pode verificar na Figura 2.15.

Já Boes, Hager (2003) interpretam a posição do ponto crítico no local onde a concentração de ar no pseudofundo atinge um certo valor e sugerem a expressão 2.11 como modo de calcular o ponto critico.

$$L_a = \frac{5.9 * d_c^{6/5}}{d_s^{1/5} * \left(\cos\theta\right)^{7/5}} \qquad (2.11)$$
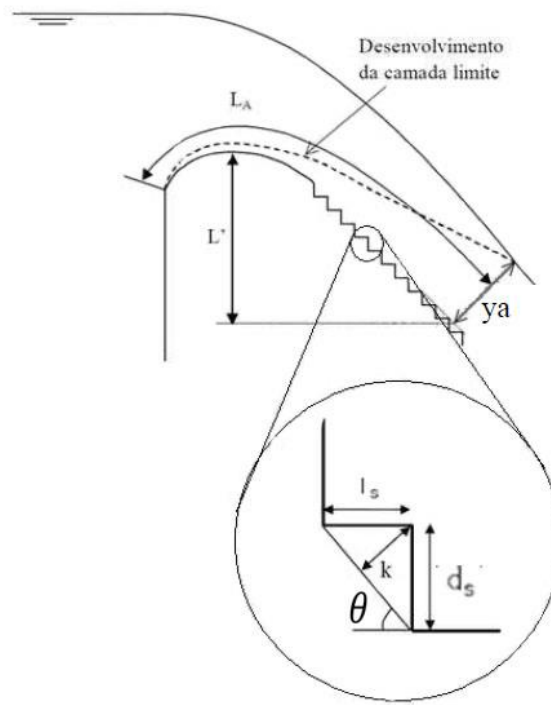
Figura 2.15 – Esquema ilustrativo dos parâmetros utilizados para a medição do ponto crítico

2.2.3.2. Escoamento com emulsionamento de ar

Desde da popularização dos descarregadores em degraus, vários estudos sobre o escoamento com emulsionamento de ar foram efetuados. Esta abrangência enorme de estudos é devido, tal como já referido, à importância que o arejamento adquire, tanto no dimensionamento das paredes como na proteção contra a cavitação. Estudos experimentais foram efetuados, mas a sua maioria foca-se sobretudo na concentração do ar e velocidade de distribuição, tais como os que foram efetuados por Chamani, Rajaratnam (1999), que sugeriram a equação 2.11 para a concentração média de ar ao longo da profundidade; Matos (1999); Chanson (2002); Boes, Hager (2003); Otshu *et al* (2004), que também sugeriu a equação 2.12 para a concentração de ar num escoamento quase uniforme; Felder, Chanson (2009) e Khdhiri *et al* (2014). Existem, igualmente, alguns estudos que se focaram na pressão que ocorre nos degraus, por autores como Yasuda, Otshu (2003); Andre (2004); Amador (2005). Análises relacionadas com a influência da macro rugosidade e de configurações não convencionais também foram efetuadas nesta área por autores como Andre (2004); Gonzalez (2005); Relvas, Pinheiro (2008) que serão também referidos no capítulo 2.2.5.

$$\overline{C} = 0.93 * \log\left(\frac{\sin\theta^{0.1}}{(q\omega)^{0.3}}\right) + 1.05 \qquad \text{em que } 0.2 < q_w < 0.27 \text{ [l/s/m]} \tag{2.12}$$

$$\overline{C} = D - 0.30 * e^{\left(-5*\left(\frac{d}{d_c}\right)^2 - 4*\left(\frac{d}{d_c}\right)\right)} \tag{2.13}$$

Onde $\overline{C}$ corresponde à concentração média de ar ao longo da profundidade do escoamento e D um parâmetro adimensional dependente do ângulo do descarregador. Sendo:

$$D = 30 \qquad 5.7^{\circ} < \theta < 19^{\circ}$$

$$D = -2*10^{-4}*\theta^2 + 2.14*10^{-2}*\theta - 3.57*10^{-2} \qquad 19^{o} < \theta < 55^{o} \qquad (2.14)$$

2.2.4. DISSIPAÇÃO DE ENERGIA NOS DESCARREGADORES EM DEGRAUS

O objetivo principal dos descarregadores em degraus é a dissipação de energia ao longo da sua soleira. Este modo de dissipação minimiza a energia do escoamento acumulada no final do descarregador e diminui, não só a erosão ao longo do descarregador, mas também os custos associados à construção de bacias de dissipação a jusante do descarregador.

Os fatores que influenciam na dissipação de energia no descarregador em degraus são os seguintes:

- Tipo de Escoamento;
- Geometria do descarregador (inclinação, geometria dos degraus, etc.);
- Emulsionamento do ar;
- Atrito.

Apesar dos vários estudos e modelos físicos realizados a nível de dissipação de energia até aos dias de hoje, ainda é difícil encontrar fórmulas e regras que generalizem esta temática nos descarregadores em degraus. A maior parte dos resultados obtidos nos estudos e experiências são bastante específicos e só se aplicam àquele caso em particular. Não sendo possível a transposição desses resultados para outros descarregadores em degraus, mesmo que estes apresentem apenas geometrias ligeiramente diferentes.

Dos primeiros estudos efetuados nesta área, é de realçar Young (1982) que analisou a viabilidade dos descarregadores em degraus para uma barragem em Stillwater, nos Estados Unidos, e conseguiu uma impressionante redução de 75% de energia ao longo do descarregador. Sorensen (1985) realizou um estudo sobre a geometria dos degraus e o seu espaçamento de modo a que a dissipação de energia fosse otimizada, num modelo físico. Sorensen (1985); Bayat (1991) e Bindo *et al*. (1993) mediram a profundidade do escoamento ao longo de descarregadores em degraus e verificaram que a dissipação de energia poderia variar entre 50% a 97%.

Rajaratman (1990) utilizou o número de Reynolds no escoamento em turbilhões para desenvolver uma fórmula para a perda de energia num descarregador em degraus de superfície lisa, relacionando o fator de resistência de Darcy-Weisbach com o coeficiente de atrito.

Após isso Stephenson (1991); Tozzi (1994); Chanson (1994b) entre muitos outros também propuseram os seus fatores de resistência de Darcy-Weisbach, como se pode ver na Figura 2.16. Segundo Chanson (2002), verifica-se uma dispersão nos valores adotados mas é possível verificar que existe uma concordância entre os valores 0.105, 0.17, 0.30. No entanto, estes valores podem ser ligeiramente alteráveis conforme os parâmetros que se considera posteriormente. A consideração de formação de vórtices e a consideração do emulsionamento de ar são alguns exemplos desses parâmetros. Na expressão 2.15 e 2.16 é possível ver as propostas de Tozzi (1994) e a de Chanson (1994b) para descarregadores com inclinações menores de 12º.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.16 + 1.24*\log\left(\frac{d}{K_s}\right) \qquad (2.15)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.42*\ln\left(\frac{D_H}{K_s}\right) - 1.25 \qquad \theta < 12^{o} \qquad (2.16)$$

Onde f corresponde ao fator de resistência de Darcy-Weisbach, K é a rugosidade do degrau e D_H o raio hidráulico do canal.
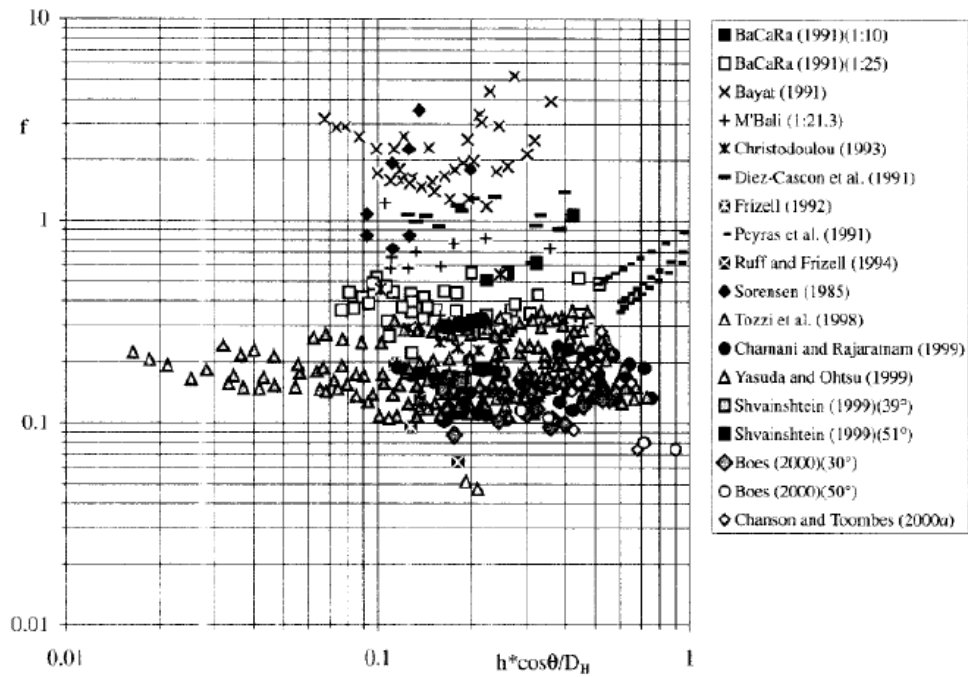
Figura 2.16 – Comparação dos fatores de resistência de Darcy-Weisbach segundo vários autores. Fonte: Chanson *et al* (2002)

Os fatores de resistência são importantes na aplicação das equações de dissipação de energia. Chanson (1994b) propôs as equações para a dissipação de energia no escoamento em quedas sucessivas e no escoamento deslizante sobre turbilhões, expressão 2.17 e 2.18 respetivamente

$$\frac{\Delta E}{E_{\max}} = 1 - \left[\frac{0.54 * \left(\frac{d_c}{d_s} \right)^{0.275} + 1.715 * \left(\frac{d_c}{d_s} \right)^{-0.55}}{\frac{3}{2} + \frac{H_{desc}}{d_c}} \right] \qquad (2.17)$$

$$\frac{\Delta E}{E_{\max}} = 1 - \left[\frac{\left(\frac{f}{8 \sin\theta} \right)^{\frac{1}{3}} * \cos\theta + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \sin\theta} \right)^{-\frac{2}{3}}}{\frac{3}{2} + \frac{H_{desc}}{d_c}} \right] \qquad (2.18)$$

Kells (1995) comparou a dissipação de energia entre o escoamento em quedas sucessivas e o escoamento deslizante em turbilhões, descobrindo que para caudais elevados a dissipação de energia é menos eficaz. Rice, Kadavy (1996) estudaram este parâmetro num modelo construído à escala 1/20 e concluíram que a dissipação de energia, num descarregador em degraus, é 2,4 a 2,6 vezes superior comparativamente a um descarregador em soleira lisa. Andre, Ramos (2004) também realizaram uma comparação semelhante, chegando à conclusão que os descarregadores em degraus conseguem dissipar entre 2 a 5 vezes mais energia que os descarregadores de soleira lisa, que os degraus com alturas elevadas

apresentam valores de dissipação de energia inferior e que os degraus convergentes apresentam comportamento idêntico aos de largura constante.

Ferreira (2009) encontrou valores para a dissipação de energia, para diferentes tipos de caudais, num descarregador em degraus com macrorugosidades. Antunes (2011) também estudou a dissipação de energia, num descarregador, semelhante ao utilizado por Ferreira (2009), mas com degraus revestidos a betão, e efetuou algumas comparações.

A tentativa de maximizar a dissipação de energia ao longo da soleira é o foco principal dos estudos realizados. Por vezes, esta situação, não é totalmente eficaz, sendo necessária a presença de dissipadores de energia a jusante do descarregador. Autores como Meireles *et al* (2005); Cardoso (2006); Cardoso (2007); Figueiredo (2010) e Sousa (2011) estudaram o impacto de uma bacia de ressalto hidráulico na dissipação de energia de um descarregador em degraus.

2.2.5. Efeitos da macrorugosidade nos descarregadores em degraus

Até aos dias de hoje, a maioria dos descarregadores em degraus têm sido dimensionados e construídos em degraus retangulares de betão com superfície lisa. Alguns autores tais como Andre *et al* (2004) dão preferência à construção, principalmente nas barragens de aterro, de descarregadores de degraus em gabiões. Neste caso, a dissipação de energia é bastante superior o que consiste em proteção extra no caso de galgamento.

Segundo Gonzalez, Chanson (2006) apesar da utilização de descarregadores de degraus em gabiões ser imensa, poucos estudos adequados foram efetuados nesta área. A complexidade dos padrões do escoamento, da turbulência e do emulsionamento do ar, já de difícil análise no descarregador de degraus em betão, no de gabiões toma proporções enormes. O facto de a superfície não ser constante e do material adquirir posições "aleatórias", cada descarregador em gabiões torna-se um caso bastante específico e dificilmente igualável em qualquer outro local. Equações ou considerações que generalizem o comportamento deste tipo de descarregadores tornam-se praticamente impossíveis.

Petras *et al* (1992) contruiu modelos experimentais com diferentes inclinações de um descarregador de degraus e comparou os resultados de um descarregador de gabiões com um descarregador revestido em betão. Utilizou também diferentes caudais para ocorrer escoamentos em quedas sucessivas e escoamentos deslizantes em turbilhões e descobriu que a dissipação de energia no descarregador em gabiões variava de 25% a 95%, uma dissipação superior ao descarregador revestido em betão.

Também Kells (1995) estudou experimentalmente a dissipação de energia com um descarregador de degraus em gabiões. No seu modelo experimental utilizou duas inclinações distintas nos degraus e concluiu que a energia de dissipação diminuía com o aumento da profundidade do escoamento e que cerca de 80% a 85% da energia total do escoamento era dissipada na passagem do escoamento pelos espaçamentos entre os gabiões, nos casos em que não ocorria galgamento. Ainda Kells (1995) não encontrou diferenças significativas nos modelos de diferentes inclinações. Chanson (1995) fez estudos semelhantes a Kells (1995) e reviu algumas considerações básicas a nível de modelos e projetos, mas as suas conclusões não foram muito diferentes deste.

Gonzalez, Chanson (2006) compararam os efeitos da dissipação de energia e nas propriedades do escoamento a nível de emulsionamento do ar, entre um descarregador em degraus de gabiões e um revestido a betão, para diferentes caudais e para os 3 tipos de escoamento (quedas sucessivas, turbilhões e de transição). Encontraram, no escoamento deslizante de turbilhões, um maior número de regiões onde existia recirculação constante da água e também verificaram uma maior infiltração quando a rugosidade era maior. O ponto crítico do escoamento encontrava-se mais a jusante do que um descarregador de

degraus revestido a betão e as velocidades encontradas nas bordas dos degraus eram superiores no descarregador de gabiões.

Chinnarasri *et al* (2008) publicou no seu estudo que os rácios de perda de energia em descarregadores de degraus com gabiões era superior nos degraus com inclinação do que nos degraus horizontais. Segundo estes autores, os degraus com uma inclinação de 45º tinham um rácio de perda de energia cerca de 10% superior a um degrau horizontal.

Ferreira (2009) estudou a dissipação de energia num descarregador de degraus com gabiões sendo depois estes resultados comparados com Antunes (2011) que efetuou um estudo semelhante, com um descarregador de igual geometria mas com revestimento em betão. Foi concluído por Antunes (2011) que nos descarregadores em gabiões, o escoamento em turbilhões é atingido mais rapidamente para caudais mais pequenos do que o descarregador revestido em betão e que as velocidades encontradas para o mesmo caudal são superiores nos descarregadores em betão. Antunes (2011) não conseguiu no entanto nenhuma comparação real a nível do regime transitório.

Salsami *et al* (2012) verificou que a diferença de inclinação nos degraus, dos descarregadores em degraus, produzia mais impacto do que a rugosidade que este apresentava.
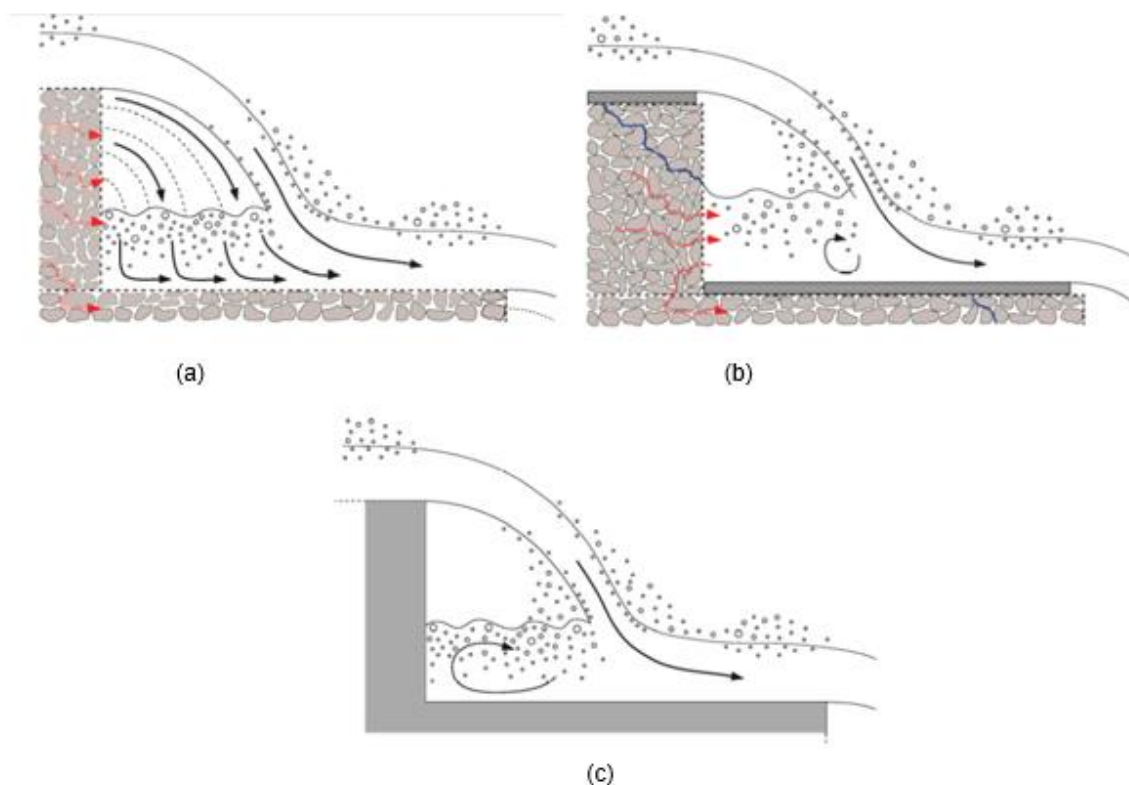
Figura 2.17 - Comportamento de um escoamento em quedas sucessivas, num descarregador em degraus de (a) gabiões, (b) gabiões com superfície superior impermeável, (c) em betão. Fonte: Gonzalez and Chanson (2006)
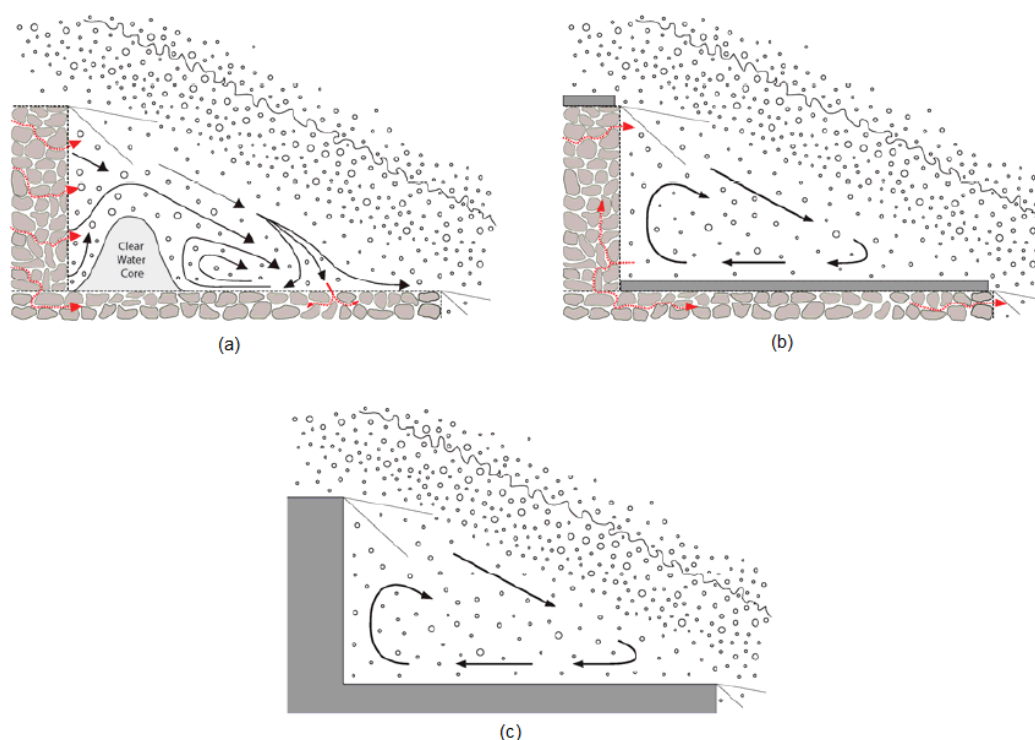
Figura 2.18 - Comportamento de um escoamento em turbilhões, num descarregador em degraus de (a) gabiões, (b) gabiões com superfície superior impermeável, (c) em betão. Fonte: Gonzalez and Chanson (2006)

2.2.6. Modelação numérica em descarregadores em degraus

Os recentes avanços dos métodos numéricos aliados com a capacidade crescente de processamento dos computadores faz com que sejam cada vez mais utilizados os modelos computacionais. S*oftware* de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para o estudo comportamental de fluídos, tanto na área industrial e científica, são exemplo disso. Apesar do processo de credibilização científica de um simulador computacional ter levado bastantes anos, nos dias de hoje já é aceite como uma representação aproximada do que acontece na realidade Gacek (2007).

A modelação numérica em estruturas hidráulicas tem vindo a aumentar exponencialmente, tal como a sua complexidade. Desde Steffler, Jin (1993) que simularam em 1D o nível de água de um descarregador a montante e ao longo deste, passando por Unami *et al* (1999) que modelou numericamente, em 2D, um escoamento de um descarregador em canal e Savage, Johnson (2001) que também realizaram uma simulação de um escoamento num descarregador em canal, mas desta vez em 3D, até aos dias de hoje inúmeras simulações numéricas usando *software* de CFD foram efetuadas a nível de estruturas hidráulicas.

No campo mais específico da análise numérica de descarregadores em degraus, pode-se referir, entre muitos, os estudos feitos por Chen (2002). Este autor estudou numericamente a relação entre o emulsionamento de ar com a altura e a inclinação dos degraus, utilizando o método VOF (*Volume of Fluid*), uma interface utilizada para modelar superfícies livres. Cheng *et al* (2004a,b) efetuou um estudo numérico semelhante a Chen (2002), mas utilizando o *software Fluent*, e comparou os seus resultados com os dados experimentais de Chason (2002). Tabbara *et al* (2005) utilizou o *software* ADINA para determinar o desenvolvimento de um escoamento deslizante de turbilhões, os vórtices que ocorriam nesse escoamento e também a evolução da dissipação de energia. Carvalho, Amador (2008) utilizaram

um algoritmo diferenciado do método VOF para simular a superfície livre de um escoamento num descarregador em degraus já existente. Para a análise e dos obstáculos internos a que o escoamento estaria sujeito, Carvalho, Amador (2008) usaram o *software Favor* e posteriormente compararam os resultados obtidos com os resultados experimentais. Lobosco *et al* (2011) aplicou as capacidades de modelação do *software OpenFOAM* e SALOME para simular um escoamento deslizante sobre turbilhões em 2 fases, com o objetivo de estudar a velocidade e o emulsionamento do ar. Meireles (2011) também realizou algo semelhante com o *software Flow3D*, para um escoamento turbulento. Após a análise computacional comparou os resultados obtidos numericamente com os resultados experimentais do modelo real do descarregador. Roushangar *et al* (2013) utilizou um sistema mais inovador, que consiste em métodos de aprendizagem artificial, usando o método ANN (*Artificial Neural Networks*) para a simulação da dissipação de energia.

3
MODELAÇÃO NUMÉRICA DE FLUIDOS

3.1. INTRODUÇÃO À MODELAÇÃO NUMÉRICA DE FLUÍDOS

Modelação Numérica de Fluídos ou Dinâmica de Fluídos Computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD* segundo a literatura inglesa) é o ramo, da mecânica dos fluídos, responsável pela resolução e análise de escoamentos através de algoritmos e métodos numéricos.

Segundo Anderson (2007), a modelação numérica computacional tem tendência a crescer. Esse facto deve-se ao aparecimento de computadores cada vez mais rápidos, capazes de dar resposta às exigências de processamento e armazenamento de dados. Se nos anos 60 a modelação numérica de fluidos era usada, quase exclusivamente, para o estudo aeronáutico, nos dias atuais é utilizado em áreas bastante distintas da engenharia e física.

Segundo Versteeg, Malalasekera (2007), os *software* utilizados para a modelação numérica de fluídos ainda são considerados de fiabilidade inferior a outros *software* de CAE (*computer-aided engineering*). Essa falta de fiabilidade, relativamente aos outros *software*, deve-se essencialmente à enorme complexidade na predição do comportamento de um fluido, resultante do comportamento não linear dos respetivos modelos matemáticos. Contudo, esta tendência tem vindo a decrescer com o surgimento de computadores cada vez mais poderosos, capazes de analisarem mais eficazmente as propriedades físicas dos fluidos.

Os *software CFD,* segundo Bakker (2006) apresentam as seguintes vantagens:

- Redução dos custos de obtenção das soluções;
- Velocidade superior na aquisição de resultados;
- Capacidade de simulação de situações ideais e/ou em grande escala, sem os efeitos de escala inerentes aos modelos físicos;
- Precisão e facilidade de compreensão dos resultados.

A simulação, envolvendo fluídos, em modelos físicos consegue ser bastante dispendiosa. Um modelo físico, dependendo da complexidade, para além do material necessário para recriar o protótipo também necessita de vários equipamentos de medição e a contratação de pessoal especializado. Existe mesmo casos, exemplificando os processos de transferência de calor e escoamentos hipersónicos, onde os modelos e os resultados são bastante árduos de criar e de interpretar.

A utilização de *software* de modelação numérica de fluídos necessita de um investimento inicial, a nível de licenças e aquisição de *hardware*. No entanto, os custos desse investimento, comparativamente à construção de modelos físicos são pequenos, principalmente em modelos de larga escala. Com os computadores a tornarem-se, a cada ano que passa, mais poderosos, já se torna possível efetuar algumas

simulações de fluídos, em computadores pessoais. Com a popularização das simulações CFD, já começam a surgir no mercado *software* para utilização, sem qualquer custo (*freewares, opensource*), como é o caso do *OpenFoam*.

A modelação numérica também apresenta vantagens a nível da recolha e estudo dos dados. É possível analisar qualquer parâmetro e propriedade física, em qualquer região ou ponto do escoamento. Uma outra vantagem importante de realçar é a possibilidade, com os programas de modelação numérica de fluídos, de simulação de um escoamento para qualquer tipo de condições físicas.

Apesar das vantagens apresentadas, a modelação numérica de fluídos ainda apresenta bastantes limitações e problemas. Segundo Bakker (2006), as principais limitações e problemas dos *software* CFD são os seguintes:

- Erros numéricos;
- Condições Fronteira;
- Soluções CFD são tão precisas como os modelos físicos em que são baseados.

Já Versteeg, Malalasekera (2007), consideram que os principais problemas dos *software* CFD são os erros numéricos e as condições fronteiras, e que estes estão relacionados bastantes vezes. Segundo estes autores, um escoamento simulado em *software* CFD, apresenta inúmeros fatores que precisam de ser considerados e que podem passar despercebidos inicialmente. No processo de modelação numérica de fluídos é bastante comum desprezar fatores que acabam por ser importantes ou de considerar valores errados para estes. Exemplo disso são os efeitos das bolhas de ar num escoamento muito turbulento e da definição da temperatura ambiente.

Os erros numéricos também são bastante comuns. Grande parte deles ocorrem devido ao algoritmo utilizado na programação dos *software* CFD. Esta situação é bastante compreensível devido a tentativa de resolução de equações físicas e matemáticas bastante complexas. Os algoritmos numéricos têm todos as suas características específicas, sendo bastante complicado, a maior parte das vezes, ter conhecimento da causa de um erro numérico. É necessário uma compreensão bastante elevada em algoritmos numéricos conciliada com uma procura minuciosa, muitas vezes por tentativas, para achar a causa do erro.

À semelhança das experiências e simulações em modelos físicos, também nas simulações numéricas é necessário no final uma avaliação crítica dos resultados. Após essa avaliação considera-se a simulação como válida ou não.

3.2. PARTICULARIDADES DE FERRAMENTAS CFD

Os programas de modelação numérica de fluídos são estruturados com base em algoritmos numéricos que conseguem simular o comportamento dos fluidos. Independentemente do *software* em questão, segundo Versteeg, Malalasekera (2007), todos eles contêm 3 fases principais:

- Pré-Processamento;
- Processamento;
- Pós-Processamento.

No pré-processamento é a etapa onde são colocadas todas as propriedades físicas e informações sobre o escoamento que se pretende simular. Os dados necessários a introduzir nesta fase são:

- A definição da região em estudo;
- A geometria do caso de estudo, através de malhas;

- A definição das propriedades do fluído;
- A especificação apropriada das condições fronteira.

Na definição da geometria, o volume das células em que a malha se vai dividir, afeta a precisão dos resultados finais. Quanto mais volumosas as células, menos precisos serão os resultados finais mas mais rápido será o processamento da simulação. Cabe ao utilizador encontrar o ponto ótimo pretendido, entre rapidez/precisão.

Ainda nesta fase, na introdução das propriedades do escoamento e dos seus valores, segundo Ferziger, Peric (2002), deve-se ter em conta os seguintes pontos:

- **Consistência**. A precisão da solução deve ser tanto maior quanto menor for a dimensão da malha;
- **Estabilidade**. Os métodos utilizados não devem aumentar os erros gerados no decorrer do cálculo;
- **Convergência.** A solução deve convergir para um determinado valor
- Precisão;
- **Conservação**. O processo de cálculo deve obedecer às leis de conservação.

A fase de Processamento é, tal como o nome indica, a fase onde os dados são processados e resolvidos. O tempo desta fase é dependente dos métodos de resolução e de discretização, abordados nos subcapítulos 3.4 e 3.5 respetivamente.

O pós-processamento dos *software* de modelação numérica consiste em analisar os resultados obtidos da simulação. A análise dos dados está cada vez mais desenvolvida neste tipo de programas, sendo estes equipados com ferramentas de visualização cada vez mais versáteis. A própria visualização do comportamento do escoamento é possível, apesar de ser algo relativamente recente. É também possível obter gráficos de evolução dos dados simulados, facilitando assim a interpretação dos resultados. Nesta fase, tal como já foi referido, é importante avaliar a credibilidade da simulação. Tal como os modelos físicos, também as simulações numéricas sofrem erros ao longo da sua resolução, alterando assim a solução final (Versteeg, Malalasekera (2007)).

3.3. MALHAS

Uma malha computacional é a representação do modelo físico em estudo por meio de linhas e pontos. O tipo de malha utilizado para determinado problema pode ter um impacto significativo na simulação numérica, inclusive na precisão da solução. As malhas também devem apresentar uma pormenorização que permita calcular os parâmetros físicos relevantes no escoamento em estudo (Munson *et al* (2010)).

Segundo Anderson (1995), as malhas podem ser agrupadas segundo a Figura 3.1.
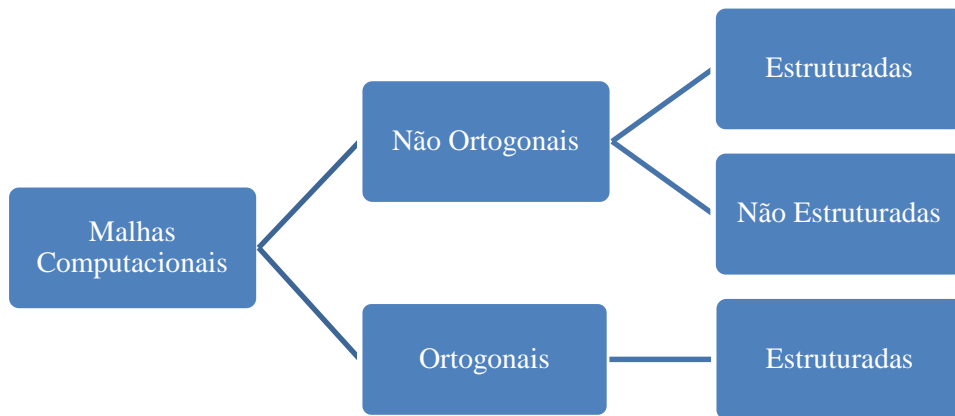
Figura 3.1 - Tipos de malhas. Fonte: adaptado de Anderson (2005)

As malhas estruturadas apresentam, normalmente, uma estrutura regular e coerente que pode ser definida matematicamente. Uma característica visual que as faz rapidamente reconhecíveis é o facto de cada volume interno ser rodeado pelo mesmo número de células vizinhas. Este tipo de malhas podem apresentar características ortogonais e não ortogonais, como é demonstrado na Figura 3.2 e Figura 3.3, respetivamente. Na malha estruturada não ortogonal (Figura 3.3), é possível verificar que os volumes internos são menores perto da fronteira. Devido aos fenómenos que acontecem nessa região, o escoamento necessita de uma maior atenção. O facto de os volumes internos serem menores faz com que seja possível obter os valores das propriedades físicas do escoamento com maior precisão (Munson *et al* (2010)).
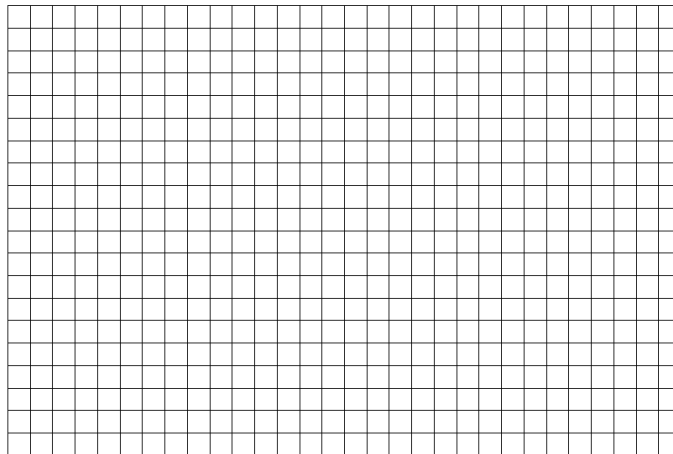
Figura 3.2 - Malha Estruturada Ortogonal. (Fonte: *Paraview* (2012))
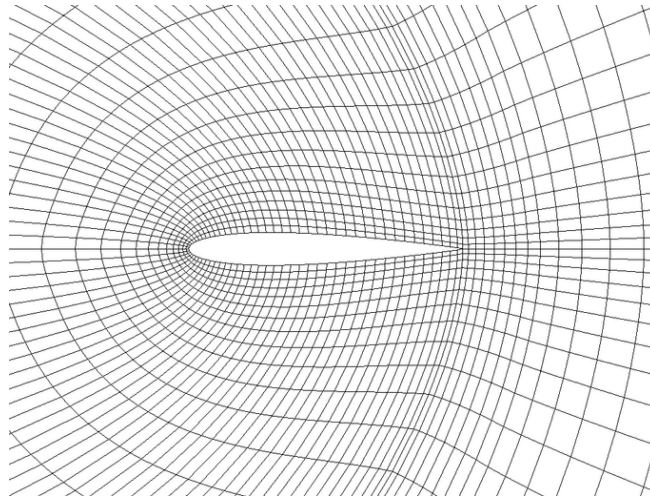
Figura 3.3 - Malha Não Ortogonal Estruturada (Fonte: *Paraview* (2012))

A malha ortogonal, segundo Gonçalves (2007), é uma malha de simulação mais simples, no entanto, apenas pode ser aplicada a geometrias de pequena complexidade. Uma outra desvantagem provém da pouca precisão, que a malha ortogonal apresenta, em regiões relevantes, tais como as fronteiras, a superfície entre outras regiões que exijam especial atenção.

As malhas não estruturadas têm um arranjo de volumes internos irregular e não é possível verificar um padrão na sua disposição (Figura 3.4). A geometria desta malha é composta por vários triângulos de diferentes formas, para problemas de duas dimensões, e tetraedros para problemas de três dimensões. A vantagem principal das malhas não estruturadas é a possibilidade da sua aplicação a geometrias bastante complexas. Os códigos computacionais, para este tipo de malhas, são mais flexíveis logo, não necessitam de ser alterados em zonas onde é necessário refinar a malha (paredes, superfícies, etc.) (Munson *et al* (2010)).

Como desvantagem principal as malhas não estruturadas apresentam uma irregularidade da estruturação dos dados e um aumento da complexidade e formulação (Gonçalves (2007)).
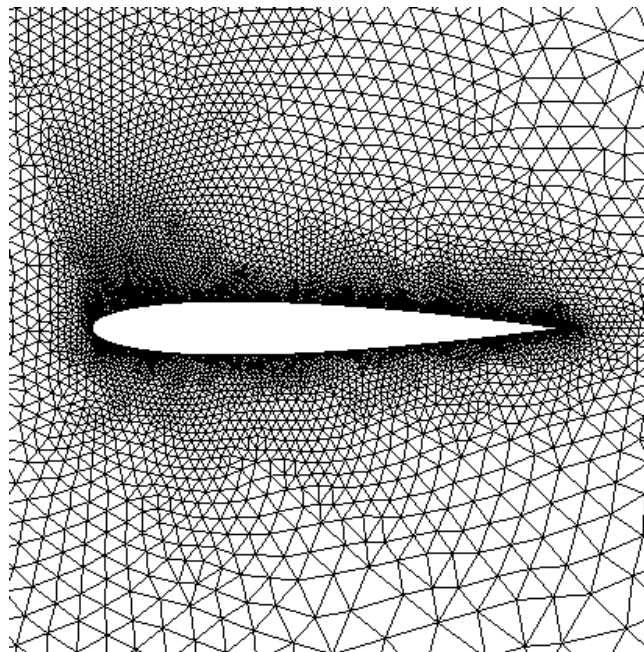
Figura 3.4 - Malha Não Estruturada (Fonte: TU Delft (2000))

3.4. PRINCÍPIOS GOVERNATIVOS DA DINÂMICA DOS FLUÍDOS

Os programas de modelação numérica de fluídos utilizam uma série de fórmulas e equações para a resolução das simulações apresentadas. A base destas fórmulas e equações, segundo Anderson (1995), provêm dos chamados princípios governativos da dinâmica dos fluídos. Estes princípios são:

- Conservação de Massa (Lei da Continuidade);
- Conservação da Quantidade de Movimento (Segunda Lei de Newton);
- Conservação de Energia (Primeira Lei da Termodinâmica).

A formulação matemática destes princípios conservativos pode ser escrita de forma integral ou diferencial. A escrita na forma integral considera a mudança de massa, movimento ou energia dentro do volume de controlo, um volume no espaço no qual o fluído consegue entrar e sair. Para a escrita das fórmulas na forma diferencial é aplicado o teorema de *Stokes* de modo a que se chegue a uma expressão que aplique as leis conservativas a um volume infinitesimal. É na forma diferencial que a maior parte da programação da modelação da dinâmica dos fluídos assenta (Anderson (2007)).

3.4.1. CONSERVAÇÃO DE MASSA - LEI DA CONTINUIDADE

De acordo com Young *et al* (2010), a lei da continuidade afirma que para existir conservação de massa a sua taxa de variação temporal no interior do volume de controlo mais o fluxo líquido de massa através da superfície de controlo tem de ser igual a zero. Esta lei pode ser transmitida através da equação 3.1.

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{cv} \rho dV + \int_{cs} \rho \vec{u} * \vec{n} dA = 0 \qquad (3.1)$$

Onde ρ corresponde à densidade do fluído, $\vec{u}$ à velocidade absoluta do fluído e $\vec{n}$ ao vetor unitário normal ao elemento de área dA.

Aplicando o teorema de Gauss à equação 3.1, consegue-se obter a sua forma diferencial que se transmite na equação 3.2.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla * (\rho \bar{u}) = 0 \qquad (3.2)$$

Para fluídos incompressíveis, como é o caso de estudo desta dissertação, a densidade do fluído, ρ, é constante logo é possível simplificar a equação 3.2 na equação 3.3

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \qquad (3.3)$$

3.4.2. CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO - SEGUNDA LEI DE NEWTON

A Segunda Lei de Newton, quando aplicada a um fluido em movimento afirma que a força resultante numa partícula é igual à taxa temporal de variação do seu momento linear. Esta lei é simplificada pela equação 3.4.

$$\vec{F} = m * \vec{a} \qquad (3.4)$$

Onde $\vec{F}$ corresponde ao vetor Força, ρ à massa do corpo e $\vec{a}$ à sua aceleração.

De acordo com Anderson. *et al* (2009), as forças atuantes, num fluido, podem ser distinguidas em dois diferentes tipos:

- **Forças atuantes no corpo** – Atuam diretamente na massa volumétrica do fluído (força gravitacional, magnética);
- **Forças atuantes à superfície** – Atuam diretamente na superfície do fluído. Estas forças só podem provir da pressão distribuída por um outro fluido ou pela tensão tangencial e normal.

Com estas forças em mente é possível formular o vetor Força, da equação 3.4, na equação 3.5.

$$F_i = \left(-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nabla \tau_{ij} \right) + \rho f_i \qquad (3.5)$$

Onde τ_{ij} representa a tensão tangencial e normal na direção dos vetores i e j, ρ a densidade do fluído, p a pressão e f_i as forças atuantes no corpo na direção x_i, para o caso a analisar estas forças serão simplesmente a ação gravítica.
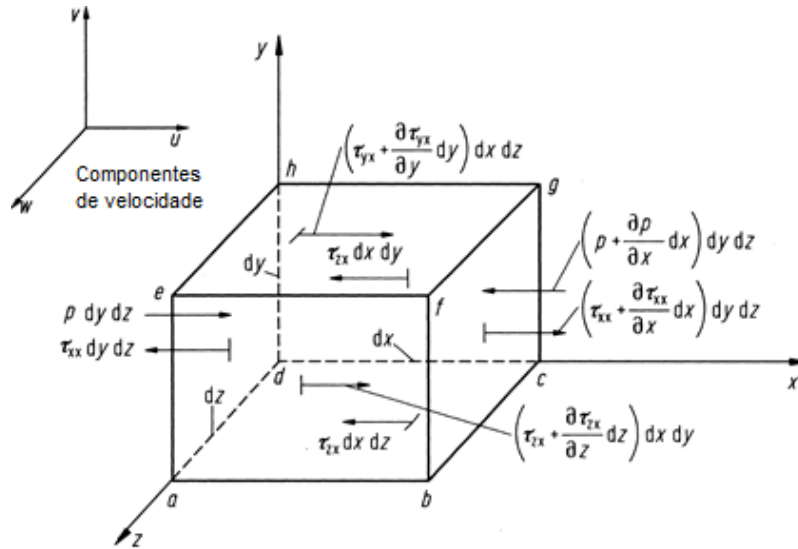
Figura 3.5 – Exemplo de forças atuantes no corpo na direção x Fonte: adaptado de Anderson (2009)

É de realçar que a massa de um elemento fluído é fixa e segundo Anderson (2009), pode ser considerada a:

$$m = \rho \, dx \, dy \, dz \qquad (3.6)$$

Sendo a aceleração, a taxa de variação da velocidade em função do tempo, então:

$$a_i = \frac{Du_i}{Dt} \qquad (3.7)$$

Sendo u_i a velocidade na direção x_i e t o tempo.

Com a junção das equações 3.5, 3.6 e 3.7 obtém-se a chamada equação de *Navier-Stokes* na forma não-conservativa.

Para se obter a forma conservativa desta equação, aplica-se a derivação da lei de conservação ao momento linear, que segundo Anderson (2009) pode ser simplificada na equação 3.8

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \nabla * (\rho u_i) = \left(-\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \nabla \tau_{ij} \right) + \rho f_i \qquad (3.8)$$

A diferença da forma conservativa e não conservativa das equações incide na diferença do método de partição das derivadas. Para uma derivada ser considerada conservativa, tem de formar uma série telescópica. Por outras palavras, quando se adiciona termos numa série, apenas os termos fronteira devem permanecer. Para escoamentos regulares livre de choques é aconselhável utilizar a forma não conservativa da equação, no caso de escoamento irregulares, complexos, e/ou que sofram bastante choques e/ou com superfícies irregulares é aconselhável utilizar a forma conservativa (Anderson (1995)).

Os fluídos em estudo nesta dissertação (ar e água) tratam-se de fluídos newtonianos. Os fluidos newtonianos são fluidos em que cada componente da tensão tangente é proporcional ao gradiente de velocidade na direção normal a essa componente. A fórmula conservativa da quantidade de movimento pode ser simplifica na equação 3.9.

$$\rho\left[\frac{\partial u_i}{\partial t}+\frac{\partial\left(u_i+u_j\right)}{\partial x_i}\right]=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\mu\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2}+\rho f_i \qquad (3.9)$$

Onde μ corresponde à viscosidade do fluido.

Segundo Pinto (2008) a resolução das equações de *Navier-Stokes* é tão complexa que não é possível obter uma solução analítica, sendo necessária uma solução computacional. Apenas recentemente a tecnologia se tem mostrado com capacidade de resolver tais grandezas.

3.4.3. Conservação da Energia – Primeira Lei da Termodinâmica

Segundo Munson *et al* (2010) a primeira lei da termodinâmica, aplicada à mecânica dos fluídos, pode ser resumida no seguinte esquema:

$$\left\{\begin{array}{c}\text{Taxa de mudança}\\ \text{da energia total armazenada}\\ \text{no elemento fluido}\end{array}\right\}=\left\{\begin{array}{c}\text{Taxa líquida de}\\ \text{energia adicionada}\\ \text{por transferência de calor}\end{array}\right\}+\left\{\begin{array}{c}Taxa\ líquida\ de\ energia\\ adicionada\ pelas\ tranferências\\ de\ trabalho\ no\ elemento\ fluido\end{array}\right\}$$

Segundo Versteeg, Malalasekera (2007), a taxa líquida de energia adiciona por transferência de calor às partículas de um fluido é dada pela diferença entre a taxa de calor que entra por uma face e a taxa de calor que sai por outra. Esta transferência de calor pode ser simplificada na equação 3.10, com a ajuda da lei de *Fourier*, que relaciona o fluxo de calor com o gradiente da temperatura local.

$$-\nabla\vec{q}=\nabla\left(K\nabla T\right) \qquad (3.10)$$

Onde $\vec{q}$ é o vetor de fluxo de calor, K a condutividade térmica e T a temperatura.

A taxa líquida de energia adicionada pelas transferências de trabalho no elemento fluído, ainda segundo Versteeg, Malalasekera (2007), são causadas devido às forças atuantes na superfície e no corpo do fluido. O trabalho efetuado por essas forças é dado pela expressão 3.11.

$$\nabla(p\vec{u})+\left[\sum\nabla\left(u_j*\tau_{ij}\right)\right]+\rho\vec{f}*\vec{u} \qquad (3.11)$$

Onde $\nabla\left(p\vec{U}\right)+\left[\sum\nabla(U_j*\tau_{ij})\right]$ representa as transferências de trabalho causadas pelas forças atuantes na superfície e $\rho\vec{f}*\vec{u}$ representa as transferências causadas pelas forças que atuam diretamente no corpo, que no caso em estudo, tal como já referido, apenas alude à gravidade.

Finalmente a taxa de mudança de energia total armazenada no fluído pode ser equacionada segundo a equação 3.12. Esta fórmula afirma que a energia total num fluido em movimento por unidade de massa,

é a soma da sua energia interna por unidade de massa, e, com a energia cinética por unidade de massa, $\frac{u^2}{2}$.

$$\rho \frac{D}{Dt}\left(e + \frac{u^2}{2}\right) \tag{3.12}$$

Unindo as equações 3.11, 3.12 e 3.13 obtemos a forma final equação da energia, equação 3.13, aplicada aos fluídos, na sua forma não conservativa.

$$\rho \frac{D}{Dt}\left(e + \frac{u^2}{2}\right) = \nabla(k\nabla T) + \nabla(p\vec{u}) + \left[\sum \nabla(u_j * \tau_{ij})\right] + \rho\vec{f} * \vec{u} \tag{3.13}$$

Segundo Anderson *et. al* (2009), a forma conservativa da equação de energia, é obtida, derivando materialmente, a equação 3.13. Obtém-se assim a equação de energia final na forma conservativa, equação 3.14.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\rho\left(e + \frac{u^2}{2}\right)\right] + \nabla * \left[\rho\left(e + \frac{u^2}{2} + \vec{u}\right)\right] = \nabla(k\nabla T) + \nabla(p\vec{u}) + \left[\sum \nabla(u_j * \tau_{ij})\right] + \rho\vec{f} * \vec{u} \tag{3.14}$$

3.5. NOÇÃO DE TURBULÊNCIA

Segundo George (2013), a turbulência é o estado de movimento de um fluido que é caracterizado pela aparente aleatoriedade e pelos vórtices caóticos em 3 dimensões. Quando a turbulência está presente num fluido, normalmente, esta domina todos os outros fenómenos do escoamento e resulta num aumento da eficácia da dissipação de energia, do arrastamento e da transferência de calor.

A habilidade de gerar vórtices durante um escoamento turbulento é uma característica essencial para este se manter. Existe uma grande variedade de escalas geométricas no que respeita aos vórtices num escoamento turbulento. De acordo com Silveira-Neto (1991) os vórtices de maior dimensão são criados e controlados pela geometria onde o escoamento se efetua. Rodi (1984) explica que estes vórtices extraem a energia cinética do movimento rotacional, que é transportado dos vórtices de maior escala para os mais pequenos, até os efeitos de viscosidade dissiparem a energia. Este fenómeno é designado de cascada de energia. Na Figura 3.6 é possível observar esta explicação:
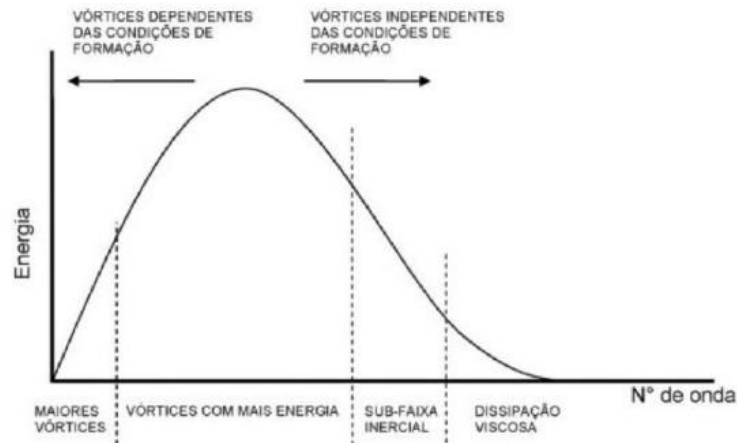
Figura 3.6 - Espectro de Energia num Escoamento Turbulento Fonte: Ramos (2012)

Não são apenas os vórtices e a aleatoriedade que definem um escoamento turbulento. Tennekes, Lumley (1972) afirmam que a difusidade, o elevado número de *Reynolds*, a dissipação de energia e o facto de a velocidade apresentar componentes transversais ao sentido do escoamento principal são características também típicas de escoamentos turbulentos.

3.6. Modelos de Resolução Numérica de Turbulência

Tal como referido no subcapítulo 3.5, a turbulência causa o aparecimento de uma grande variedade de vórtices que interagem entre si de modo bastante complexo. A turbulência é um tipo de escoamento com uma difícil resolução e com muitas aplicações práticas. Por estas razões inúmeros investigadores dedicaram-se e ainda se dedicam a desenvolver métodos que possam capturar os efeitos da turbulência da forma mais eficaz possível. Segundo Versteeg, Malalasekera (2007), existem atualmente 3 métodos distintos:

- Modelo Baseado nas Equações Médias de Reynolds (*RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes*);
- Método da Simulação das Grandes Escalas (*LES – Large Eddy Simulation*);
- Simulação Numérica Direta (DNS – Direct Numerical Simulation).

3.6.1. Modelos Baseados nas Equações Médias de Reynolds

Os escoamentos turbulentos são caracterizados por flutuações de velocidade no tempo e no espaço. Segundo Wendt (2009) estes podem ser resolvidos pela aplicação direta das equações de *Navier-Stokes.* Devido ao processo demorado de resolução, essas equações podem ser simplificadas com a ajuda das equações de Reynolds dando origem a um grupo chamado *RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes.*

Segundo Versteeg, Malalasekera (2007), as equações *RANS* resultam de uma média temporal das equações de *Navier-Stokes.* Visto que para a maior parte dos projetos de ciência e engenharia é desnecessário resolver todos detalhes de flutuação da turbulência, a média temporal das propriedades do escoamento é suficiente. Por esta razão, a resolução por modelo RANS é uma das mais utilizadas na simulação de escoamentos.

É importante realçar que a equação de *Navier-Stokes* é um sistema determinado. O modelo de resolução RANS introduz novas incógnitas, as chamadas tensões de *Reynolds*, sem a introdução de novas equações.

A equação Reynolds da quantidade de movimento nas coordenadas cartesianas é a seguinte:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho \bar{u}_i\right)+\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j\right)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\mu \frac{\partial^2 \mu_i}{\partial x_i \partial x_j}-\rho\left(\overline{u'_{m_i}}\,\overline{u'_{mj}}\right) \qquad (3.15)$$

Onde $\rho\left(\overline{u'_{m_i}}\,\overline{u'_{mj}}\right)$ corresponde às variações de tensão aparente devido ao campo de velocidade flutuante, as chamadas tensões de *Reynolds.*

Para resolver a tensão de Reynolds existem 3 principais categorias do modelo RANS de acordo com Versteeg, Malalasekera (2007):

- Modelos lineares de viscosidade turbulenta (*Linear Eddy Viscosity Model*);
- Modelos não lineares de viscosidade turbulenta (*Non-Linear Eddy Viscosity Model*);

- Modelo de tensão de Reynolds (RMS – Reynolds Stress Model).

Os modelos não lineares de viscosidade turbulenta são utilizados para relacionar os gradientes de velocidade média e turbulência, no entanto são abordados numa relação não linear. O Modelo de tensão de *Reynolds* é considerado o modelo mais complexo do método de resolução RANS, devido a calcular 6 diferentes tipos de equações de transporte em simultâneo (George (2013)).

Não é objetivo desta dissertação a pormenorização de todos estes modelos. Apenas serão abordados os modelos lineares de viscosidade turbulenta mais utilizados hoje em dia.

3.6.1.1. Modelos Lineares de Viscosidade Turbulenta (Linear Eddy Viscosity Model)

De acordo com Celik (1999), os modelos lineares de viscosidade turbulenta são os modelos de resolução RANS mais antigos. Estes modelos têm por base o conceito de viscosidade de turbilhões de *Boussinesq*. Este assume que, em semelhança à tensão de viscosidade nos escoamentos laminares, as tensões de viscosidade dos escoamentos turbulentos são, também, proporcionais ao gradiente da velocidade média. A hipótese de *Boussinesq* também considera que o comportamento dos vórtices é semelhante ao comportamento das moléculas na teoria cinética (Bertin *et al* (1992)).

Estas considerações são formuladas matematicamente através da equação 3.16.

$$\rho\left(\overline{u}'_{m_i}\,\overline{u}'_{mj}\right) = \mu_T\left(\frac{\partial \overline{u}'_{m_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}'_{mj}}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} \qquad (3.16)$$

Onde μ_T é a viscosidade turbulenta dos vórtices (a sua expressão depende do tipo de modelo utilizado) e C_μ o seu coeficiente. k é a energia cinética turbulenta e ε a dissipação de energia turbulenta. δ_{ij} é designado como delta de *Kronecker,* este adquire o valor 1 para $i = j$, e o valor de 0 para $i \neq j$. Segundo Rodi (1984) o conceito de modelo de *Boussinesq* considera μ_T como isotrópico (possuiu as mesmas propriedades independentemente da direção). Esta suposição, apesar de não ser totalmente verdade, provou ser adequada para muitas aplicações.

Existem imensas variedades de modelos de viscosidade turbulenta mas estes agrupam-se, segundo Versteeg, Malalasekera (2007), devido ao número adicional de equações de transporte que precisam de ser calculadas, juntamente com as equações gerais do modelo RANS. Os modelos lineares de viscosidade turbulenta podem ser agrupados da seguinte forma:

- Modelos de zero equações/Modelos Algébricos;
- Modelos de uma equação;
- Modelos de duas equações;
- Modelos de três equações.

Tal como já foi referido para cada um destes grupos existe uma variedade enorme de modelos de resolução. De modo exemplificativo existe os modelos Cebeci-Smith e o Baldwin-Lomak, para os modelos algébricos, os modelos Wolftein e Baldwin-Barth para os modelos de uma equação e o modelo k-ω-A para os modelos de três equações. Estes são apenas alguns da enorme variedade existente. Como já foi referido, nesta dissertação apenas se irá abordar os mais utilizados. De acordo com Wilcox (1998) esses modelos são os modelos turbulentos de duas incógnitas: o modelo k-ε e o modelo k-ω.

3.6.1.1.1 Modelo *Standard k-ε*

O modelo *k*-ε é um modelo de duas equações. Esse facto permite considerar os efeitos de convecção e difusão da energia turbulenta no escoamento, tal como a sua evolução histórica. Neste modelo semi-empírico, a primeira variável extra de transporte é a variável de energia cinética turbulenta, *k*, e a segunda variável extra é a dissipação da turbulência, ε.

A variação *"standard k-ε"* foi proposta por Launder, Sharma (1974). Este modelo assume que o escoamento é totalmente turbulento e os efeitos da viscosidade molecular são desprezáveis. Para resolução das duas equações de transporte *k* e ε, este modelo baseia-se nas equações 3.17 e 3.18 respetivamente.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_T}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M \qquad (3.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (3.18)$$

Onde σ_k, σ_ε, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ e $C_{3\varepsilon}$ são constantes, o valor destas constantes são dependentes do modelo *k-epsilon* utilizado. Para o modelo *standard k-ε* estes valores podem ser encontrados no Quadro 2. G_k é a geração de energia cinética turbulenta devido ao gradiente da velocidade média, equação 3.19; G_b é a geração de energia cinética turbulenta devido às condições fronteira, equação 3.20, e Y_M as contribuições da dilatação turbulenta que ocorre na superfície.

$$G_k=\mu_T S^2 \qquad (3.19)$$

Onde S é o módulo da média da tensão de deformação.

$$G_b=-\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)*g*\frac{\mu_T}{\mathrm{Pr}_t}\frac{\partial T}{\partial x_i} \qquad (3.20)$$

Onde Pr_t é o número turbulento de Prandtl para a energia, o seu valor pode ser encontrado no Quadro 2 e g corresponde à componente gravitacional. O valor de μ_T é calculado através da equação 3.21 .

$$\mu_T=\rho C\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (3.21)$$

Segundo Versteeg, Malalasekera (2007) as equações 3.17 e 3.18 podem ser resumidas por palavras, da seguinte forma:

$$\left\{\begin{matrix}\text{Taxa}\\ \text{de mudança}\\ \text{de k ou }\epsilon\end{matrix}\right\}+\left\{\begin{matrix}\text{Transporte}\\ \text{de k ou }\epsilon\\ \text{por conveção}\end{matrix}\right\}=\left\{\begin{matrix}\text{Transporte}\\ \text{de k ou }\epsilon\\ \text{por difusão}\end{matrix}\right\}+\left\{\begin{matrix}\text{Taxa}\\ \text{de produção}\\ \text{de k ou }\epsilon\end{matrix}\right\}-\left\{\begin{matrix}\text{Taxa}\\ \text{de destruição}\\ \text{de k ou }\epsilon\end{matrix}\right\}$$

De acordo com Kositgittiwong *et al* (2013), o modelo *standard k-ε* só é válido para escoamentos completamente turbulentos, onde os efeitos viscosos moleculares possam ser minimizados, face ao movimento turbulento.

No geral, este modelo pode ser utilizado para escoamentos turbulentos de superfície livre e escoamentos interiores. No entanto, só se obtém bons resultados caso os gradientes de pressão sejam baixos. Este

modelo também é desaconselhado para escoamentos com separação da camada limite, fluídos rotativos, mudanças súbitas na taxa de estrangulamento e em superfícies curvas.

Quadro 2 - Valores das constantes do modelo *standard k-ε*

Constantes	*standard k-ε*
σ_k	1.00
σ_{ε},	1.30
$C_{1\varepsilon}$	1.44
$C_{2\varepsilon}$	1.92
$C_{3\varepsilon}$	0.20
Pr_t	0.85
C_{μ}	0.09

3.6.1.1.2 Modelo *Wilcox k-ω*

O modelo *k-ω* apresenta muitas semelhanças com o modelo *k-ε*. Ambos enquandram-se na categoria de modelos de duas equações e também incluem uma equação diferencial para a variável da energia cinética turbulenta, *k*. A diferença principal entre os dois modelos é a segunda variável. No modelo *k-ω*, calcula a taxa de dissipação de energia, *ω* Esta variável determina a escala da turbulência, ou seja considera apenas a taxa a que a dissipação de energia ocorre (Celik (1999)).

Wilcox (1988) propôs um modelo de resolução do método *k-ω*. Considerando que a taxa de dissipação específica, *ω*, pode ser relacionada com a energia cinética turbulenta, *k*, e com a dissipação de energia, *ε*, através da equação 3.22.

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_{\mu} k} \qquad (3.22)$$

As equações em que o modelo Wilcox (1988) se baseia para a resolução da energia cinética turbulenta e da dissipação específica são respetivamente:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + \tau_{ij}\frac{\partial k}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega \qquad (3.23)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_{\omega}}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] + \alpha \frac{\omega}{k}\tau_{ij}\frac{\partial k}{\partial x_j} - \beta \rho k \omega \qquad (3.24)$$

Onde σ_k, σ_w, β^*, β, α são constantes que podem ser consultadas no Quadro 3. τ_{ij} pode ser substituído por $-\rho\left(\overline{u_{m_i}{}' u_{m_j}{}'}\right)$ e é resolvido através da equação 3.16. Quanto à viscosidade turbulenta, μ_t, pode ser calculada através da equação 3.25.

$$\mu_T = \rho \frac{k}{\omega} \qquad (3.25)$$

Segundo Versteeg, Malalasekera (2007), a principal vantagem do modelo k-ω é a forma simples e exata como são calculados os comportamentos do escoamento junto das paredes, para baixos números de *Reynolds*. Para regiões longe das paredes a taxa de dissipação tende para zero e a viscosidade turbulenta começa a tender para um valor infinito. Este facto faz com que os valores apresentados pelo modelo *Wilcox* k-ω não sejam de confiança. Para colmatar essa falha, Menter (1993) formulou o modelo *Shear-Stress Transport (SST).*

Quadro 3 - Valores das constantes do modelo Wilcox k-ω

Constantes	*Wilcox* k-ω
σ_k	2
$\sigma_{w'}$	2
β^*	$\frac{9}{100}$
β	$\frac{3}{40}$
α	$\frac{5}{9}$

3.6.1.1.3 Modelo Shear Stress Transport k-ω

O Modelo *Shear Stress Transport* (SST) k-ω, desenvolvido por Menter (1993) é a combinação de dois tipos de modelo: o modelo k-ε e o modelo k-ω. Esta combinação verifica-se bastante vantajosa, pois, deste modo as principais fraquezas que os modelos anteriores possuem são eliminadas. O modelo *SST* k-ω comporta-se como um modelo k-ω nas regiões próximas das paredes, modificando para um comportamento típico do modelo k-ε nas regiões externas do escoamento. Para além disso uma diferença relevante entre o modelo *Wilcox* k-ω e *o SST* k-ω encontra-se na inclusão dos efeitos de transporte no cálculo da viscosidade turbulenta, equação 3.26.

$$\mu_T = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega S F_2)} \qquad (3.26)$$

Desta forma é possível prever o início e o tamanho de separação do escoamento.

O modo de cálculo da energia cinética turbulenta é igual ao modelo *Wilcox* k-ω (equação 3.23), no entanto a forma de calcular a taxa de dissipação de energia específica altera-se para a equação 3.27.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_{\omega 1}}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] + \alpha S^2 - \beta\omega^2 + 2(1-F_1)\sigma_{\omega 2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial \omega}{\partial x_i} \qquad (3.27)$$

Onde α_1, β, $\sigma_{\omega 1}$, $\sigma_{\omega 2}$ são constantes que podem ser consultadas no quadro 4 e F_1 e F_2 são valores obtidos pelas equações 3.28 e 3.29, respetivamente.

$$F_1 = \tanh\left\{\left\{\min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^*\omega y},\frac{500\mu}{y^2\omega}\right),\frac{4\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega}y^2}\right]\right\}^4\right\} \quad (3.28)$$

$$F_2 = \tanh\left[\left[\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^*},\frac{500\mu}{y^2\omega}\right)\right]^2\right] \quad (3.29)$$

Sendo CD_{kw}:

$$CD_{k\omega} = \max\left(2\rho\sigma_{\omega 2}\frac{1}{\omega\alpha}\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial \omega}{\partial x_i},10^{-10}\right) \quad (3.30)$$

Versteeg, Malalasekera (2007) alerta que o modelo SST k-ω produz níveis de turbulência bastante elevados em regiões estagnadas e em regiões com aceleração elevada, apesar de vários autores obterem bons comportamentos e resultados utilizando este modelo

Quadro 4 - Valores das constantes do modelo SST k-ω

Constantes	SST k-ω
σ_k	1.0
σ_{w1},	2.0
σ_{w2},	1.17
β^*	$\frac{9}{100}$
β	$\frac{3}{40}$
α_1	$\frac{5}{9}$

3.6.2. Método da Simulação das Grandes Escalas (LES)

Smagorinsky (1963) desenvolveu um modelo, baseado nas equações de *Navier-Stokes* para a simulação de grandes escalas atmosféricas, na impossibilidade de o fazer para todo o espectro. Este modelo começou a ser introduzido na engenharia por Deardoff (1970) e hoje em dia é utilizado em variadas áreas de simulações tais como: combustão, acústica, hidráulica, simulações atmosféricas entre muitas outras.

Segundo Celik (1999), o principal objetivo do modelo LES é simular apenas os movimentos a grandes escalas que são criados devido à geometria ou às condições específicas do escoamento. O modelo LES parte do princípio que os movimentos de pequena escala apresentam um comportamento isotrópico e, portanto, são menos afetados pelas condições de contorno. Por essa razão esses movimentos podem ser descartados, facilitando assim os cálculos da simulação.

O modelo LES utiliza uma filtragem espacial para separar os vórtices de pequena dimensão dos de grande dimensão. Durante esta filtragem, a informação relativa aos movimentos de pequena dimensão são destruídos, permitindo ao modelo resolver numericamente o comportamento do escoamento,

utilizando as equações de *Navier-Stokes*, nos movimentos de grandes dimensões (Versteeg, Malalasekera (2007)).

O modelo LES para fluídos incompressíveis utiliza a seguinte fórmula de cálculo:

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\overline{u}_i \overline{u}_j\right) = \frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j}\right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \qquad (3.31)$$

Onde $\overline{u}$ e $\overline{p}$ são respetivamente os vetores da velocidade e pressão após a filtração e τ_{ij} a tensão residual que é formulada consoante o submodelos de malha utilizados.

De acordo com Versteeg, Malalasekera (2007), o modelo LES apresenta uma elevada precisão no cálculo das tensões de *Reynolds* e dos termos de transporte escalar. Como consequência dessa precisão há necessidade de um maior poder computacional e da presença de uma malha muito fina. O modelo LES necessita do dobro do processamento, comparativamente ao modelo RANS, para o mesmo cálculo. A necessidade de uma malha muito fina, segundo Pionelli (2004), provém das simulações terem de ser resolvidas de modo a que as tensões de corte dos vórtices sejam as tensões com maior relevo. Para que tal aconteça a filtragem utilizada não poderá ser mais larga que uma pequena fração fixa da escala turbilhonar local. Esta escala diminuiu à medida que a parede se aproxima, e com ela a largura do filtro.

Quando se fala na resolução pelo modelo LES, há que realçar que só há poucos anos os computadores começaram a ter poder de processamento suficiente para a simulação de escoamentos por este método (Versteeg, Malalasekera (2007)).

3.6.3. Simulação Numérica Direta (*DNS)*

A simulação numérica direta fundamenta-se na modelação numérica de escoamentos através das equações de *Navier-Stokes*, sem qualquer ajuda ou aproximação de modelos de turbulência. Toda a extensão das escalas turbulentas temporais e espaciais têm de ser resolvidas, independentemente do seu tamanho. Isto significa que, na simulação numérica direta o vórtice mais pequeno e a flutuação mais rápida são resolvidas, ou seja, qualquer movimento, independentemente da sua irrelevância, é resolvido.

Segundo Moin, Mahesh (1998) as vantagens da simulação numérica direta podem ser resumidas em 3 pontos:

- Detalhes extremamente precisos dos parâmetros e da movimentação da turbulência em qualquer ponto do escoamento;
- Resultados instantâneos, que não são possíveis de obter através da experimentação, conseguem ser gerados na simulação numérica direta;
- Modelação de escoamentos turbulentos, impossíveis de acontecer na realidade, para a melhor perceção da física deste tipo de escoamentos (ex: paredes sem tensões).

Apesar destas vantagens, a simulação numérica direta continua quase exclusivamente aplicada à investigação e a números de *Reynolds* baixos. O facto de todos os parâmetros serem minuciosamente modelados, tem como consequência uma modelação numérica muito demorada e dispendiosa (Versteeg, Malalasekera (2007)).

3.7. Métodos para a Discretização no Espaço

Para entender os métodos utilizados para a discretização no espaço, inicialmente é preciso ter um bom entendimento do que é a discretização espacial. A discretização pode ser definida como a partição de um todo em partes menos complexas, com a finalidade de facilitar os cálculos.

O princípio da continuidade, abordado no capítulo 3.4.1, afirma que a matéria é um meio contínuo, sem vazios interiores. Tendo em conta este princípio, que não considera a estrutura molecular e apenas a sua forma macroscópica, é possível transferir as equações governativas contínuas para valores discretos homólogos. Os métodos de discretização espacial são uma ferramenta que possibilita aproximar essas equações governativas, por um sistema de equações algébricas, das variáveis do problema. Estas variáveis serão obtidas em localizações discretas no espaço e no tempo (Blasek (2001)).

Segundo Versteeg, Malalasekera (2007) existem vários métodos de discretização. Os mais utilizados em programas CFD são:

- Método dos Elementos Finitos (MEF);
- Método dos Volumes Finitos (MVF);
- Método das Diferenças Finitas (MDF).

O Método dos Elementos Finitos é maioritariamente utilizado para análise estrutural, no entanto também é aplicado a alguns tipos de fluído, como é exemplo o gás natural. Segundo Surana *et al* (2007), se o método MEF for cuidadosamente formulado com os princípios governativos dos fluídos, no modo conservativo, consegue efetuar os cálculos de forma bastante estável. A aplicação deste método aos fluídos é um processo muito demorado e pouco compensatório.

O método das diferenças finitas é dos métodos mais antigos e mais simples para a resolução de equações diferenciais. Devido à sua simplicidade, exige pouco poder computacional para a resolução dos comportamentos de escoamentos. Comparativamente aos outros métodos existentes, os resultados são pouco precisos. No entanto, o maior problema deste método é considerado a inflexibilidade geométrica, apenas geometrias bem estruturadas são aceites.

O método dos volumes finitos (MVF) é atualmente o mais utilizado na programação de *software* CFD. Sendo este o método que foi utilizado para a realização desta dissertação, será o único dos métodos aprofundado.

3.7.1. Método dos Volumes Finitos

Os volumes que circundam cada nó existente na malha são chamados de volumes finitos. O primeiro passo do método dos volumes finitos é dividir a malha num número de volumes de controlo. O volume de controlo é o elemento da malha que se transformou no domínio da solução. Em cada um destes aplica-se o conceito de continuidade. Por outras palavras, é a divisão da malha em domínios pequenos para a facilitação dos cálculos. A variável de interesse para a aplicação deste método está localizada no centróide do volume de controlo (Kolditz (2001)). Após a divisão, o método dos volumes finitos integra a forma diferencial das equações governativas (que foram referidas no capítulo 3.5) em cada volume de controlo. Através de interpolações são determinados os valores das variáveis entre os centróides e os nós vizinhos. Este processo resulta na denominada equação de discretização, que expressa a lei governativa para a variável dentro de cada volume de controlo, permitindo assim chegar à solução global.

A maior vantagem do método MVF é o cumprimento das leis conservativas da massa, dos momentos e da energia independentemente do número e do tamanho dos volumes de controlo. Esta característica permite que o método FVM possa ser aplicado a geometrias complexas e invulgares (Eymard *et al* (2003)).
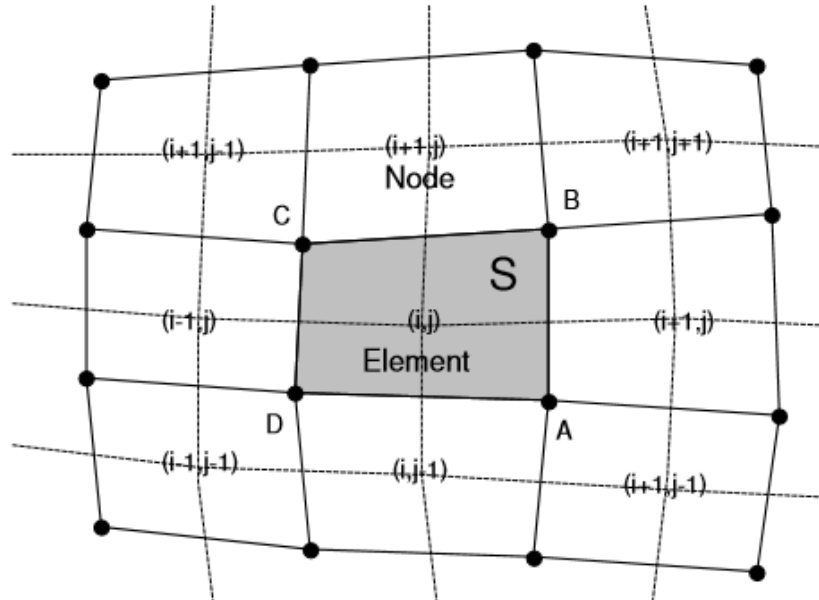
Figura 3.7 - Esquematização de Volume Finito de duas dimensões Fonte: Kolditz (2001)

4

PROCEDIMENTO NUMÉRICO

4.1. CASO DE ESTUDO

4.1.1 DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO

Os descarregadores em degraus utilizados para a modelação numérica realizada nesta dissertação, são baseados em dois modelos que se encontram no Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Os dois descarregadores distinguem-se principalmente pelo seu revestimento. Os degraus e as paredes de um dos descarregadores são revestidos em betão, Figura 4.1, e o outro simula a sua escavação direta na rocha sem qualquer tipo de revestimento posterior, Figura 4.2. Esta diferença tem impacto na sua rugosidade e por consequência na capacidade de dissipação de energia.

A geometria de ambos os modelos apresenta um comprimento total de 2.6 m e uma altura de 1.0 m, que origina uma inclinação aproximadamente de 21.04º. Os descarregadores possuem 26 degraus, cada um com aproximadamente 3.75 cm de altura e com uma largura que varia entre os 15 cm e os 5 cm. Essa diferença de largura pode ser dividida em 2 troços, como é possível observar na Figura4.3. No primeiro troço, que corresponde aos degraus 1 a 13, é linearmente decrescente de montante para jusante, com uma largura entre 15 cm e 5 cm. No segundo troço, do degrau 14 ao degrau 26, apresenta uma largura constante de 5cm.

Figura 4.1 - Pormenor dos degraus do descarregador de degraus em betão.

Figura 4.2 - Pormenor do canal do descarregador revestido em brita e gabiões.
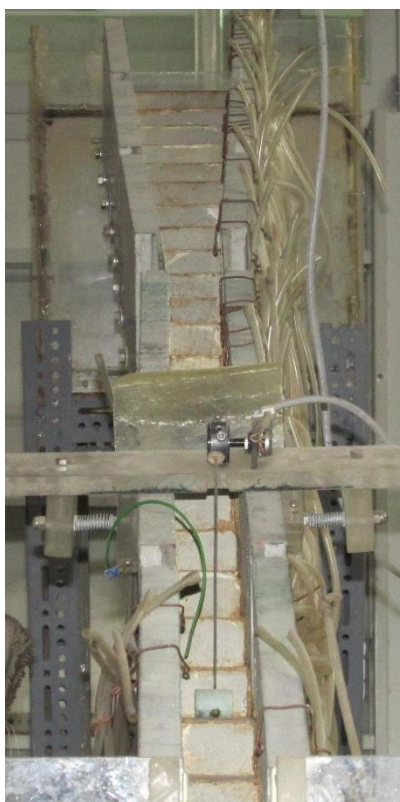
Figura 4.3 - Canal do descarregador em degraus revestido a betão demonstrando a convergência das paredes

O modelo de descarregador com rugosidade elevada foi inicialmente construído com um canal em betão. Para a simular a escavação diretamente na rocha, foram embebidas em betão, aleatoriamente ao longo

dos degraus, britas de formas e dimensões irregulares. O diâmetro máximo da brita é de 1 cm. Na Figura 4.4 é possível observar o revestimento canal e as paredes do modelo do descarregador escavado em rocha.

Figura 4.4 - Pormenor das paredes e do canal do descarregador escavado em rocha.

Como é possível observar no desenho esquemático do descarregador em degraus revestido a betão, Figura 4.5, este apresenta na extremidade a jusante um trampolim em salto de esqui com um angulo de saída de 20º. Ambos os descarregadores apresentam um reservatório de tranquilização a montante e um reservatório de recolha de águas a jusante, ambos construídos em vidro acrílico, Figura 4.5 e Figura 4.6
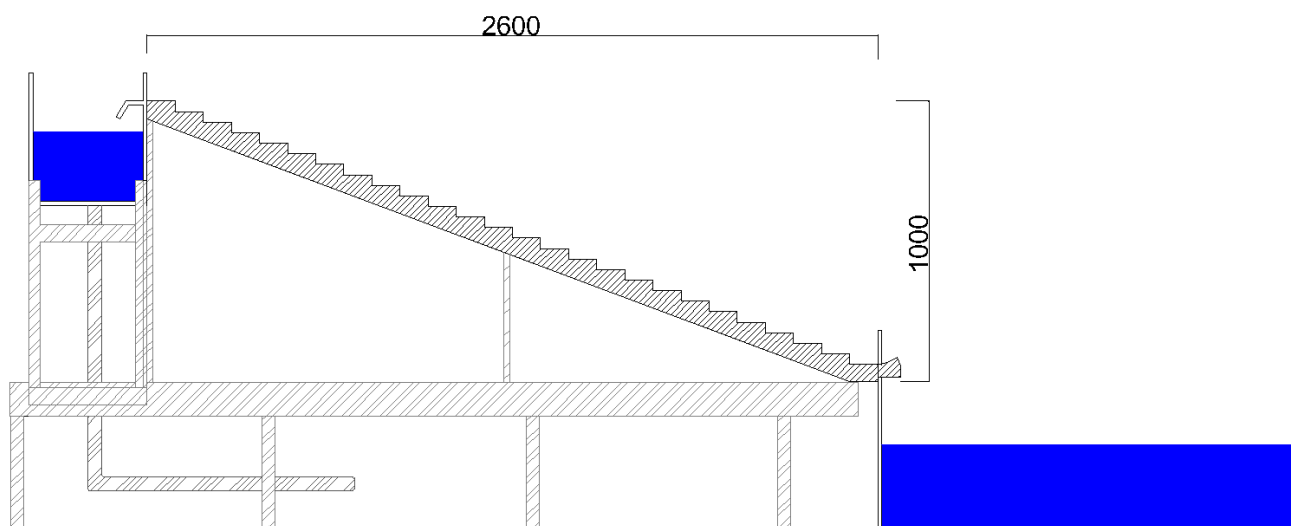
Figura 4.5 - Modelo esquemático do perfil do modelo do descarregador de degraus revestido a betão
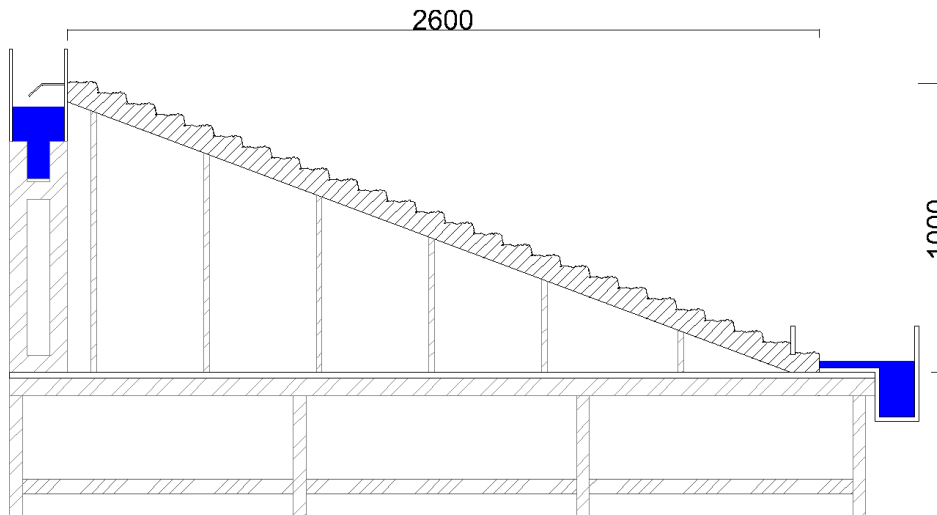
Figura 4.6 - Modelo esquemático do perfil do modelo do descarregador de degraus escavado em rocha

Convém realçar que os modelos reduzidos destes descarregadores não representam nenhum caso de estudo em concreto, tendo sido construídos para estudos puramente académicos.

4.1.2 Diferenças geométricas entre modelo numérico e modelo geométrico

O objetivo desta dissertação assenta no comportamento de um escoamento ao longo de descarregador analisando-o de modo bidimensional. Para isso foi necessário simplificar a geometria do modelo utilizado. Como será aprofundado posteriormente, o *software* utilizado para a modelação numérica, o *OpenFOAM*, necessita de uma malha tridimensional para efetuar as simulações. Devido a essa obrigatoriedade do *software* foram consideradas duas hipóteses de larguras constantes, na construção da malha, ao longo do descarregador, uma de 15 cm e outra de 5 cm. Devido aos problemas de simulação na hipótese de largura constante de 5 cm esta foi abandonada sendo as simulações apenas efetuadas para uma largura constante de 15 cm. Essas dificuldades de simulação eram devido à pequena distância entre paredes. As consequências do choque do escoamento com as paredes influenciavam diretamente a parede oposta, levando à criação de recirculações e dificuldades demasiado acrescidas nas simulações numéricas.

No descarregador em degraus revestidos em betão, não foi considerado o trampolim de esqui que este apresenta na extremidade jusante, uma vez que o objetivo desta dissertação é o comportamento do escoamento ao longo do corpo do descarregador.

Quanto ao descarregador em degraus escavado diretamente da rocha, a sua geometria é bastante aleatória, não havendo um padrão definido. Devido a esse facto, a construção da sua malha é bastante problemática. Foram considerados 2 tipos de malhas para tentar simular este descarregador o mais próximo possível do modelo apresentado anteriormente. Uma simplificada, apresentada na Figura 4.7 e outra mais próxima da realidade apresentada na Figura 4.8. As malhas foram construídas tendo em conta um padrão. A dificuldade de interpretação dos resultados finais utilizando uma malha aleatória seriam elevados. A malha utilizada inicialmente foi a malha da Figura 4.8, no entanto, devido ao seu detalhe tornou-se uma malha de difícil processamento. Optou-se pela simulação de uma malha mais simples e

generalizada Figura 4.7. Esta apenas apresenta uma macrorugosidade contínua com 5 cm de comprimento e 0.75 cm de altura, no entanto o seu processamento é mais simples.
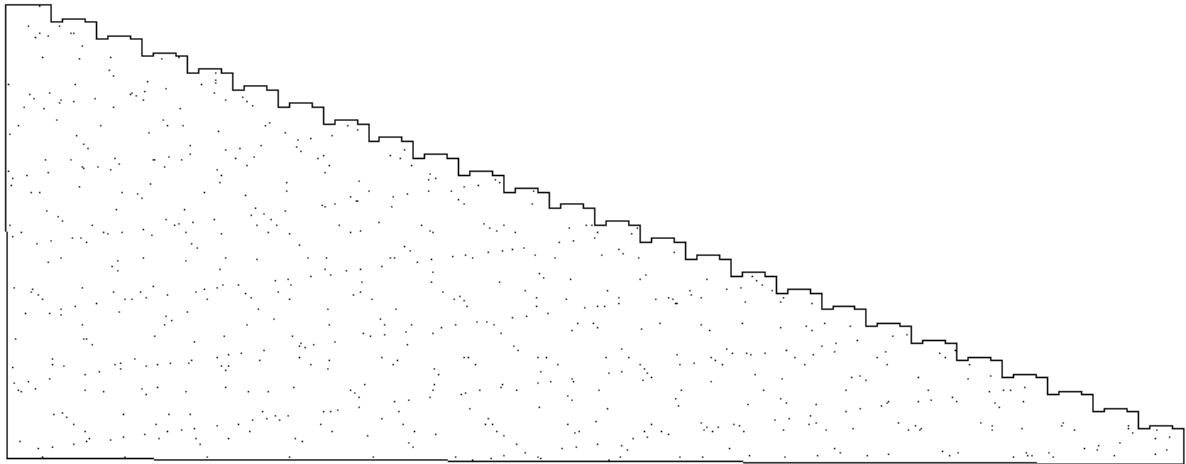
Figura 4.7 – Malha rugosa Simplificada a 2D do descarregador em degraus escavado em rocha
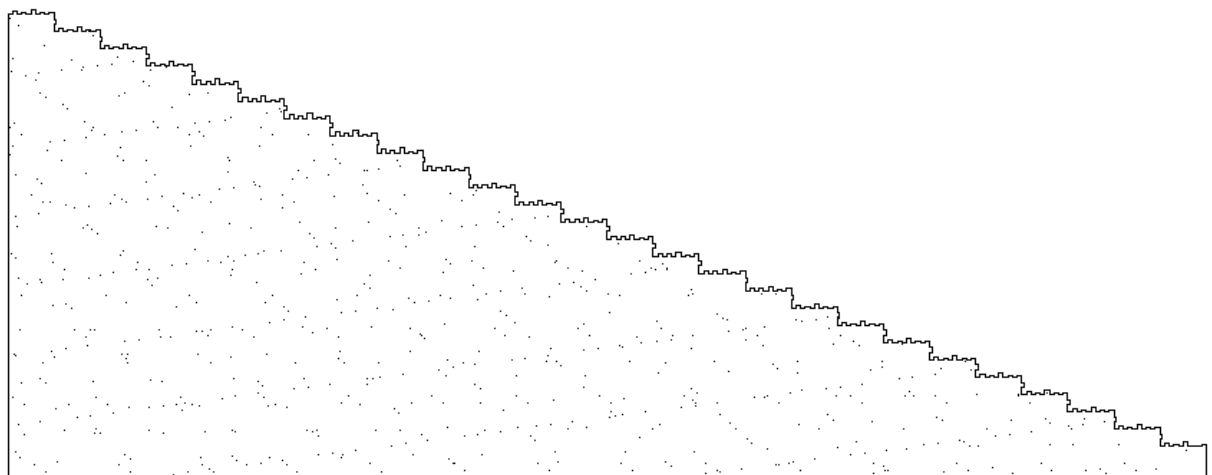
Figura 4.8 - Possível malha rugosa a 2D do descarregador em degraus escavado em rocha

4.1.3 Modelos Numéricos Estudados

Neste estudo serão efetuadas 5 simulações com diferentes variáveis. As simulações serão agrupadas, e designadas a partir deste ponto de:

- Configuração A;
    - Configuração A.1;
    - Configuração A.2;
    - Configuração A.3;
- Configuração B;
    - Configuração B.1;
    - Configuração B.2;

Na configuração A estão agrupados escoamentos que serão simulados num descarregador em degraus revestido a betão com uma rugosidade desprezável. Tendo por base os trabalhos laboratoriais de Ferreira (2009) e Meireles (2011), foram escolhidos os diferentes caudais de 1.49 l/s e 2.32 l/s que representam dois tipos de escoamento diferentes, os escoamentos de transição e os escoamentos de turbilhões. Para a configuração A.1, será simulado um caudal de 1.49 l/s e para a simulação A.2 será simulado um caudal de 2.32 l/s. Devido à geometria do descarregador modelado ser ligeiramente diferente do descarregador dos modelos utilizados por Ferreira (2009) e Meireles (2009) o comportamento dos caudais poderá-ser um pouco diferente. Para poder haver comparação com um escoamento de turbilhões foi estudado o comportamento de um descarregador para um caudal de cheio bastante elevado, 15 l/s designada de configuração A.3.

Um dos objetivos desta dissertação passa também pelo estudo do comportamento de um escoamento num descarregador em degraus com elevada rugosidade que são agrupados na Configuração B. Para esta situação foram simulados dois casos de estudo. A configuração B.1 representa um escoamento com um caudal de 2.32 l/s num descarregador com macrorugosidades acentuadas presentes ao longo deste.

A configuração B.2 também será uma simulação com um caudal de 2.32 l/s no entanto as rugosidades não serão tão elevadas. Esta última configuração apresenta ao longo do seu escoamento paredes e um canal com 1 mm de rugosidade. A malha utilizada será a mesma da Configuração A, no entanto será acrescentado, no *software* utilizado, a rugosidade nas paredes e no canal.

4.2. PROCEDIMENTO GERAL

Tal como mencionado no capítulo 2, os descarregadores em degraus têm vindo cada vez a ser utilizados. O seu baixo custo e a sua eficácia na dissipação de energia faz com que estes sejam sujeitos cada vez mais a um maior número de estudos. Ferreira (2009) e Antunes (2011) já se dedicaram à análise experimental do caso de estudo. Esta dissertação apenas se focou no estudo numérico. Sempre que se demonstre necessário e possível, os resultados obtidos numericamente serão comprados com os resultados obtidos experimentalmente.

O estudo debruçou-se sobre o comportamento do escoamento ao longo do descarregador, tal como já referido no subcapítulo anterior. Para a simulação dos escoamentos seguiu-se os seguintes passos:

1. Criação da geometria do problema;
2. Geração da Malha;
3. Escolha do Modelo de turbulência do escoamento;
4. Aplicação das condições fronteira;
5. Escolha do método de solução;
6. Execução do cálculo numérico;
7. Análise dos resultados obtidos.

Inicialmente é definido um campo à qual corresponde a geometria do problema. Essa geometria é dividida num número de elementos infinitesimais que constituem a malha. De seguida, é escolhido um modelo de turbulência, referido no capítulo 3, e ajustadas as propriedades dos fluidos e as condições fronteira. Com estas propriedades, e escolhido o método de solução processa-se os cálculos numéricos e estuda-se posteriormente a solução dada pelo *software.* O computador utilizado foi um Intel Core i7 – 3370 @ 3*.40GHz x8* com 7.8 *Gb* de *RAM* com capacidade para 933.8 *GB* de dados. Visto que o *software* de simulação *OpenFOAM* apenas funciona no sistema operativo *Linux*, foi utilizado o sistema *Ubuntu* 12.04 *LTS*.

Tal como abordado no capítulo 3, a modelação RANS é a que envolve menos poder computacional, comparando com os outros modelos de resolução turbulência abordados. No entanto, a precisão da malha e a criação de vários vórtices ao longo dos 26 degraus tornou a capacidade de computação por vezes insuficiente, principalmente no descarregador com macrorugosidades.

4.3. *SOFTWARE* UTILIZADOS

Na resolução dos escoamentos analisados, foram utilizados 2 diferentes *software*. O SALOME foi utilizado para a criação das malhas e o *OpenFoam* para a modelação numérica.

4.3.1. OPENFOAM

OpenFOAM (Open Source Field Operation and Manipulation) é um *software* desenvolvido para solucionar algoritmos numéricos. Contém utilidades de pré- e pós-processamento para a resolução de problemas de mecânica de meios contínuos. Este é disponibilizado gratuitamente e com licença de código aberto, ou seja, é oferecida toda a liberdade ao utilizador para criar e modificar os códigos do programa para enquadrar os seus problemas. O *software OpenFOAM* é totalmente escrito em *C++*. Isto faz com que seja necessário que o utilizador possua bases nesta linguagem de programação.

A nível de resolução de fluídos incompressíveis, atualmente o *OpenFOAM* disponibiliza com o seu *download* cerca de 14 diferentes códigos de resolução. A solução dos escoamentos analisados nesta dissertação foram baseados na modificação de alguns desses códigos disponibilizados, através de várias tentativas de aperfeiçoamento.

O *OpenFOAM* funciona à volta da introdução de informação em 3 diferentes pastas.

- *constant*
- *system*
- Pastas de tempo

A pasta *constant* contém a descrição completa da malha e das propriedades físicas do escoamento. A pasta *system* contém os ficheiros relacionados com o processo de resolução do escoamento. As pastas de tempo contêm ficheiros individuais dos dados do escoamento. Esses dados são as condições iniciais que o utilizador quer que sejam calculados, tal como os seus valores no segundo 0.
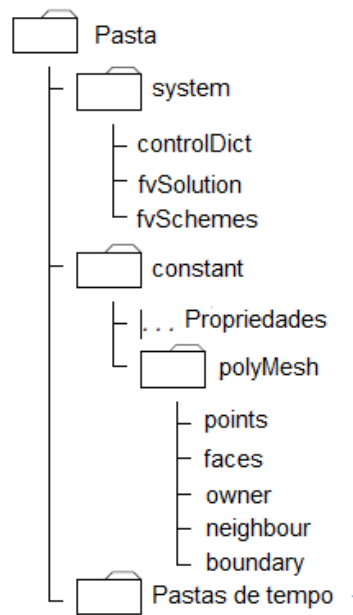
Figura 4.9 - Estrutura de pastas no *OpenFOAM* Fonte: adaptado de *OpenFOAM* Foundation (2014)

Todos estes dados são introduzidos em ficheiros de texto que contêm funções e palavras que remetem para dicionários de *C++* com o objetivo da criação das malhas e da resolução das propriedades do escoamento.

Na criação das malhas, o *OpenFOAM* utiliza a introdução de pontos com as respetivas coordenadas para a conceção de superfícies em polígonos retangulares e cilíndricos. Para malhas mais complexas é necessário utilizar um gerador de malhas externo ou o gerador de malhas disponibilizado pelo *OpenFOAM*, o *SnappyHexMesh*. Este gera malhas em 3 dimensões contendo hexaedros e divide-os automaticamente a partir de geometrias triangulares escritas em formato *stereolithography* (stl). No entanto é necessário utilizar um programa CAD para a criação do formato da malha em stl. No caso desta dissertação esse programa foi o SALOME, referido mais à frente.

Os resultados gerados pelo *OpenFOAM* podem ser visualizados utilizando a aplicação *open source ParaView*. Esta aplicação está ligada internamente ao *software OpenFOAM* como *ParaFoam*.

Apesar das grandes vantagens do *OpenFOAM*, este *software* não apresenta uma interface intuitiva e amiga do utilizador. Este fator em conjunto com a falta de manutenção da documentação existente e da falta de detalhe do guia do usuário, faz com que seja um *software* de aprendizagem difícil para iniciantes.

4.3.2. *SALOME*

SALOME é um *software* de uso gratuito que proporciona uma plataforma genérica de pré- e pós-processamento para as simulações numéricas. Este *software* é uma plataforma de Desenho Assistido por Computador (CAD – *Computer Aided Design* na literatura inglesa) para simulações digitais. O SALOME é baseado numa arquitetura aberta e flexível e pode ser considerada como a união de componentes de vários *software* gratuitos. Existem 7 módulos diferentes cada um com a sua função no SALOME:

- ***KERNEL*** – Providencia características de modificação para todos os componentes que possam ser integrados na plataforma *SALOME*

- ***GUI*** – providencia um formato para visualização com apenas algumas ferramentas básicas
- ***Geometry*** – Utilizado para a construção e otimização de modelos geométricos baseados numa grande variedade de funções CAD
- ***Mesh*** – Gera uma malha a partir de um modelo geométrico criado previamente
- ***Supervisor*** – Providencia ferramentas para a construção de gráficos e a execução de cálculos
- ***Post –Pro*** – Providencia a visualização de dados
- ***MED*** – Permite trabalhar com ficheiros .med

O SALOME é um *software* escrito tendo por base as linguagens *C++* e *Pyton*, portanto todas as formações de geometrias e malhas são realizadas através da introdução de comandos por via texto.

4.4. DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA E CONDIÇÕES FRONTEIRA

Para a definição da geometria foi utilizada a ferramenta do *OpenFOAM* designada de *blockMesh*. Esta ferramenta cria geometrias através de curvas e blocos retangulares. A geometria é gerada através de um ficheiro no dicionário chamado *blockMeshDict* localizado na pasta *constant*. Nesta ferramenta é necessário definir o número de células em cada bloco. Quantos mais blocos, maior será a precisão da simulação.

Inicialmente, define-se as coordenadas dos vértices através do modelo (O_x O_y O_z). Por definição as coordenadas são na unidade de comprimento metros, mas caso o utilizador o pretenda pode alterar para uma unidade de comprimento mais conveniente. É de notar que é obrigatório que as coordenadas dos pontos sejam em 3 dimensões.

Após a definição das coordenadas é necessário atribuir-lhes números. Estes números serão utilizados para a definição dos blocos e das condições fronteira. São necessárias 8 coordenadas para formar cada bloco. Na construção dos blocos também se define o número de células nas direções x_1, x_2, x_3 na qual este se vai dividir.

No ficheiro *blockMeshDict* é necessário, após a construção da geometria, definir a localização e as condições fronteiras. O *OpenFOAM* distingue 5 tipos de condições fronteiras:

- *patch;*
- *wall;*
- *empty;*
- *wedge;*
- *cyclic;*
- *processor.*

A condição fronteira *patch* foi utilizada para definir a atmosfera, a entrada e saída de água. Este tipo de condição serve para definir qualquer fronteira que não apresente informação geométrica ou topológica. É de ter em atenção que a condição de entrada de água apresenta dimensões diferentes conforme o problema.

A condição fronteira *empty* foi utilizada para as paredes da configuração A.3. Esta função permite que o *OpenFOAM* interprete estas fronteiras como "vazias" e que a simulação ocorra desprezando essa dimensão, ou seja, ocorre em duas dimensões. No entanto esta condição apresentou alguns problemas para a configuração A.1, A.2 e B não apresentando convergência. Nesses casos as fronteiras foram consideradas *wall*.

A condição fronteira *wall* foi utilizada nas configurações A e B para a fronteira de fundo e para a fronteira no extremo a montante do descarregador. Nas configurações A.1, A.2 e B também foram

utilizadas para as fronteiras laterais. Este tipo de condição é, tal como o nome indica, uma parede fronteira. As propriedades desta parede tal como da condição *patch* são definidas nas condições iniciais.

No final desta fase, é possível verificar através do *ParaView* o aspeto da geometria. Nas diferentes configurações ambas são bastante semelhantes a nível visual à Figura 4.10, isto porque apenas alguns pormenores as distinguem nesta fase.

4.5. GERAÇÃO DA MALHA

Há vários métodos para gerar malhas computacionais, tal como, por exemplo, desenhar a malha manualmente e depois introduzir as coordenadas dos pontos num *software* apropriado para o efeito. Como a geometria do problema abordado é uma geometria considerada complexa, o número de elementos e pontos seria demasiado elevado, por isso optou-se por gerar a malha utilizando a ferramenta incluída no *OpenFOAM*, o *SnappyHexMesh.* Esta ferramenta já abordada no subcapítulo 4.3 requer:

- Uma superfície num ficheiro de dados em formato STL, localizado na pasta *constant;*
- Uma geometria definida;
- Um dicionário *snappyHexMeshDict* com as entradas apropriadas e definidas, localizado na pasta *system*-

Para a criação do ficheiro de dados STL foi utilizado, o *software SALOME*. Neste *software* com a ajuda das suas funções CAD foi realizada uma geometria do descarregador em vista. Esta geometria é igual para as configurações A.1, A.2, A.3 pois estes representam descarregador revestido em betão, Figura 4.10, para a configuração B.2 a mesma geometria foi utilizada mas com a presença de microrugosidades. A malha da configuração B.1 apresenta nos degraus a macrorugosidade para simular o descarregador em degraus escavado em rocha, Figura 4.11. Através da função de *Mesh* do SALOME, as geometrias foram transformadas em malhas e posteriormente exportadas como ficheiros STL. Esses ficheiros foram utilizados na geração malha pela ferramenta *SnappyHexMesh*, Figura 4.12 e Figura 4.13.
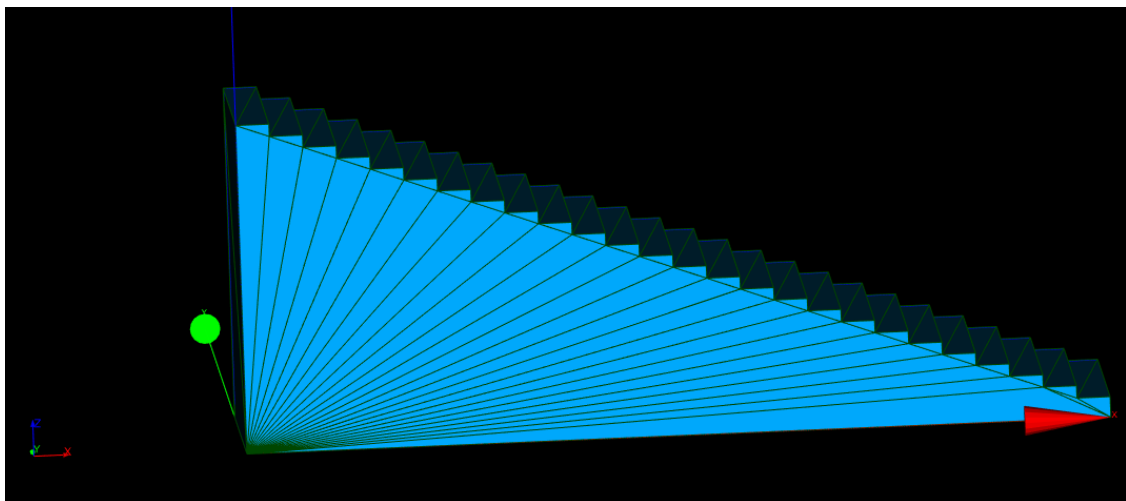
Figura 4.10 - Geometria da Malha criada no software *SALOME* para as configurações A.1, A.2,A.3 e B.2
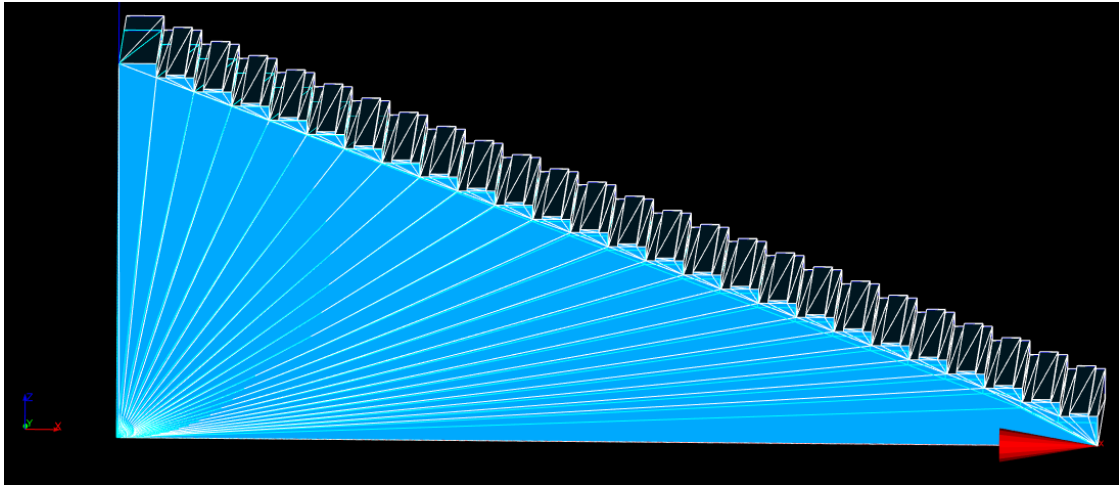
Figura 4.11 - Geometria da Malha com macrorugosidades criada no *software SALOME* para a configuração B.1
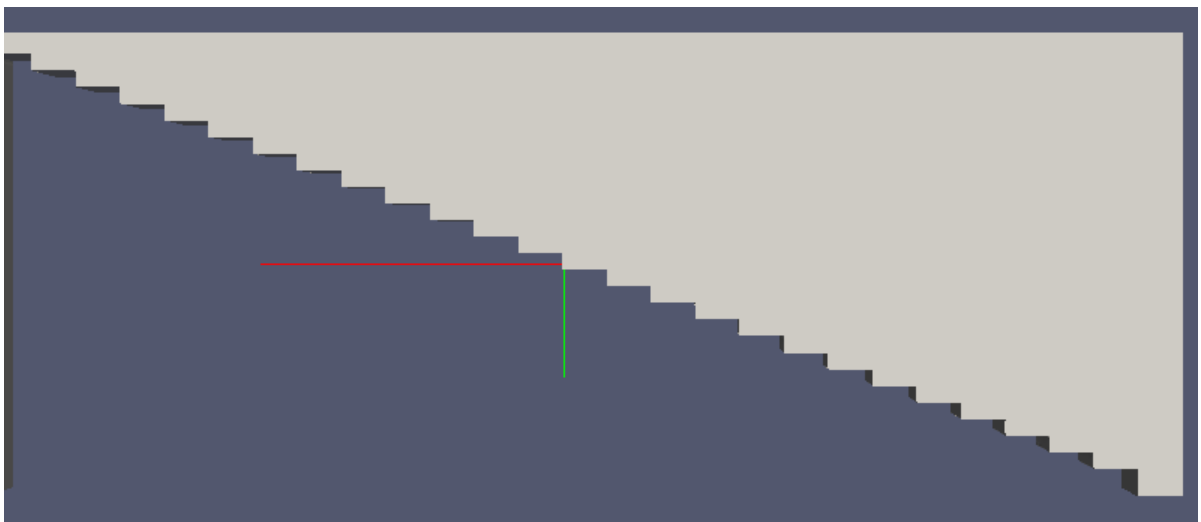
Figura 4.12 - Malha da configuração A e B.1 após processamento pelo *snappyHexMesh*
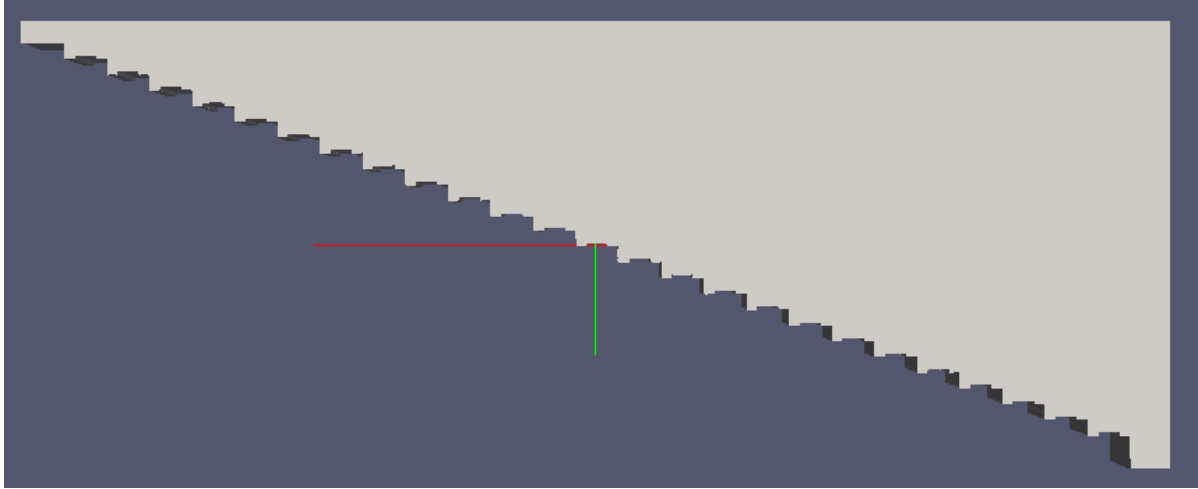
Figura 4.13 - Malha da configuração B.2 (macrorugosidade) após processamento pelo *snappyHexMesh*

Para a rentabilização do tempo de processamento sem comprometer a qualidade dos resultados é necessário refinar a malha nas zonas de maior interesse sem sobrecarregar as restantes zonas. No ficheiro *snappyHexMeshDict*, situado na pasta *system*, é possível definir as zonas da malha a refinar. Para as zonas próximas dos degraus foi definido, através do ficheiro *snappyHexMeshDict*, que cada elemento de célula com uma aresta superior a 0.8 cm sofresse uma refinação de nível 3. Uma refinação de nível 3, tal como é possível verificar na Figura 4.14, divide um elemento de célula em 8x8 células de iguais dimensões. Na Figura 4.15 e na Figura 4.16 é possível verificar a diferença antes e depois da refinação. Consegue-se comprovar que as células perto dos degraus são bastante mais pequenas e em maior número de modo a que os resultados se consigam obter com alguma qualidade.
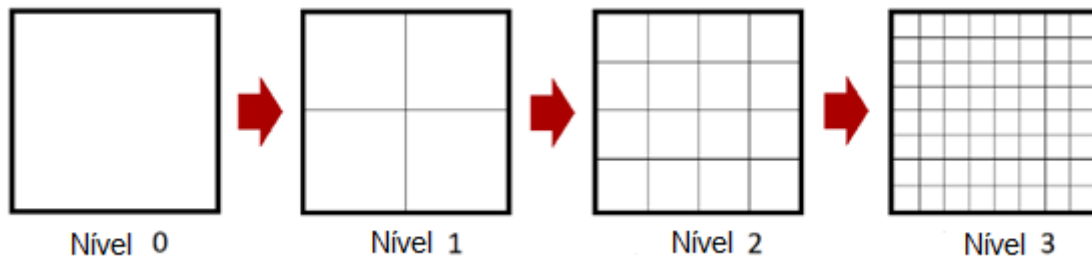
Figura 4.14 - Demonstração dos níveis de refinação do *snappyHexMesh* Fonte: adaptado de Engys (2012)
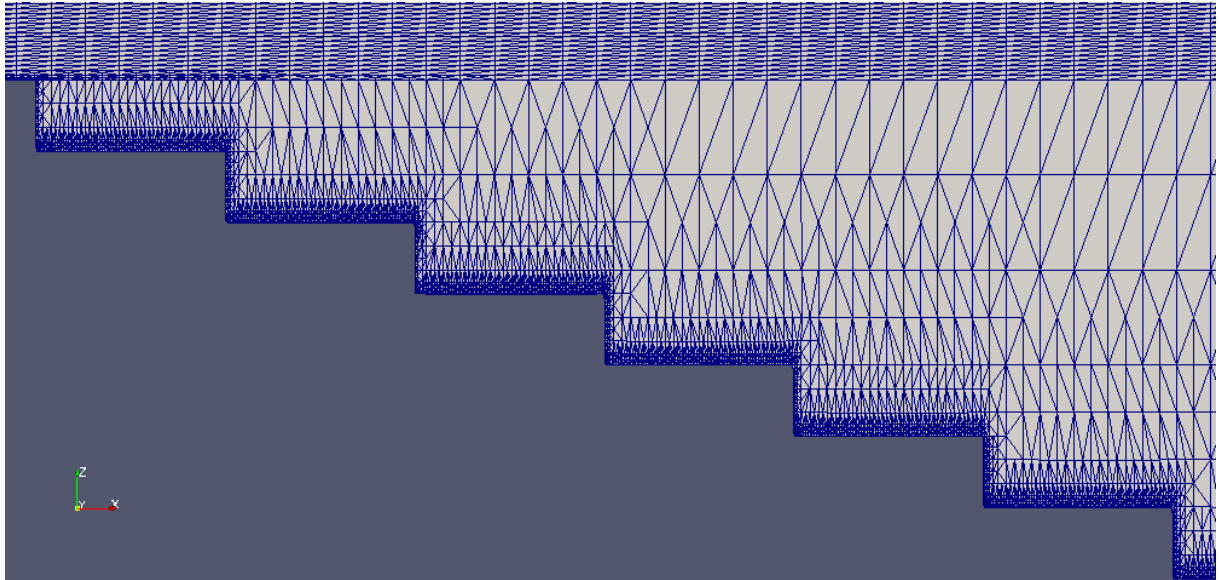
Figura 4.15 - Pormenor da malha da configuração A.2 antes da refinação
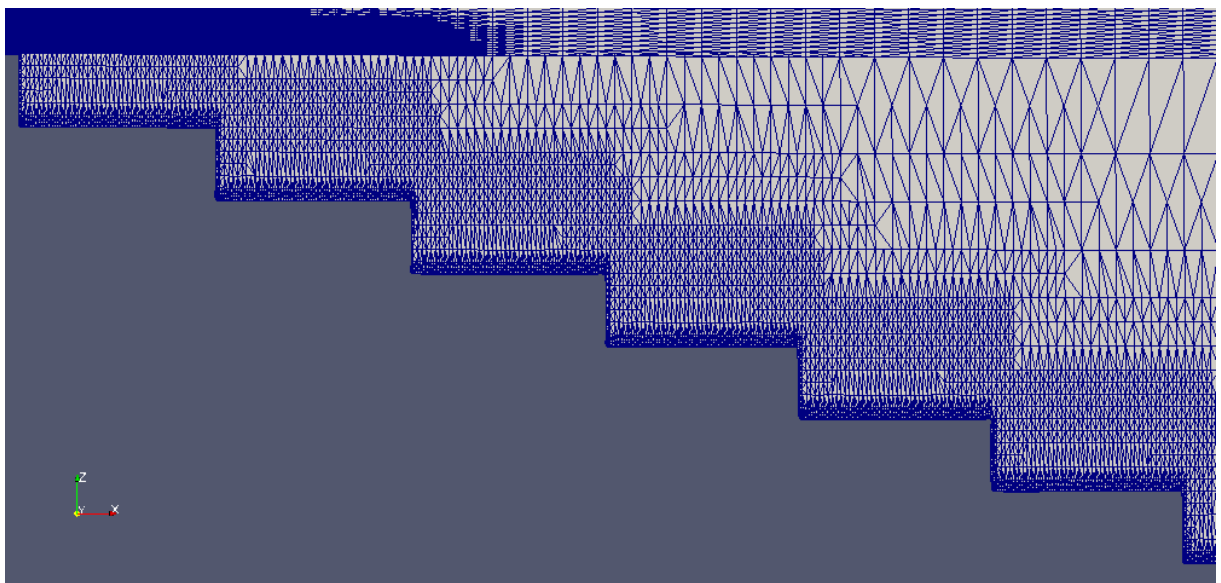
Figura 4.16 - Pormenor da malha da configuração A.2 após a refinação

Ao contrário da maioria dos *software* CFD, o OpenFOAM não permite fazer modificações na malha em tempo real. A visualização da malha utilizando o ParaView pode ser efetuada em "corte" no volume, permitindo assim um entendimento do que se passa no interior da malha.

4.6. Modelos de Resolução Numérica

A escolha dos modelos numéricos, já abordados no capítulo 3, é algo com extrema importância para os resultados finais da simulação. O *OpenFOAM* consegue simular recorrendo aos 3 métodos de resolução numéricos: RANS, LES, DNS.

Devido ao baixo caudal utilizado nas simulações e à complexidade da malha, os modelos LES e DNS foram afastados devido ao tempo de simulação ser demasiado elevado caso estes fossem utilizados.

O modelo RANS, designado por RAS (*Reynolds-Average Simulation*) no *OpenFOAM,* foi o modelo de resolução numérico escolhido para a simulação do escoamento. O *OpenFOAM* apresenta cerca de 16 diferentes modelos de resolução RAS. Destes 16, foram efetuadas tentativas de resolução numérica utilizando os métodos mais conhecidos de simulação: o método Standard k-ε e o método SST k-ω. No entanto apesar de se ter tentado efetuar algumas simulações utilizando o método de resolução Standard k-ε estas não foram bem-sucedidas. Tal como abordado no capítulo 3, o modelo Standard k-ε, possui dificuldades de modelação junto às parede e necessita que o escoamento se apresente num estado de total turbulência. O insucesso nas modelações, utilizando esse método, pode ter como causa a pequena distância apresentada entre as paredes no modelo utilizado e o facto de no início do escoamento este não apresente um comportamento de total turbulência.

No *OpenFOAM* ao lidarmos com um escoamento do tipo turbulento, é necessário criar um ficheiro, na pasta *constant* designado de *turbulenceProperties*. Neste ficheiro define-se qual o tipo de modelo de resolução numérica que se pretende utilizar, neste caso o modelo RAS. Ao definir este método, é necessário criar mais um ficheiro, na mesma pasta, designado de *RASProperties*. Nesse ficheiro é definido o modelo RAS a utilizar, neste caso o Standard k-ε e o método SST k-ω, e se pretendemos utilizar os coeficientes padrões do modelo ou não (ver Quadro 2 e Quadro 3). Para as configurações em estudo esta opção foi tomada.

4.7. Condições Iniciais

As condições iniciais do escoamento representam os ficheiros inseridos na pasta *"0"*. Esta pasta corresponde às condições que o escoamento no seu inicio, ou seja antes do começo da simulação. O nome dos ficheiros inseridos representam as propriedades que se pretende calcular na simulação. No caso das configurações em questão foram inseridos os ficheiros de texto com as seguintes propriedades:

- ***alpha1*** **--** corresponde ao grau de preenchimento da célula pelo escoamento;
- ***nut*** **-** que corresponde às características das paredes;
- ***U*** – que corresponde à velocidade;
- ***k*** – que corresponde à energia cinética turbulenta;
- ***p_rgh*** – que corresponde à pressão;
- ***omega/epsilon*** – que corresponde à dissipação de energia especifica/ dissipação da energia turbulenta.

O ficheiro *alpha1* corresponde às células em que o fluido se encontra ou não presente, sendo apenas necessário utilizar os valores de 0 a 1. Utiliza-se o valor 0 caso a célula não apresente qualquer vestígio do fluído e 1 caso esta se encontre totalmente preenchida. Neste caso foi definida a zona fronteira *inletWater* como a única zona fronteira onde o fluido está presente no início da simulação

No ficheiro *nut* define-se as características das paredes. Na simulação em paredes de betão, configuração A, a rugosidade foi considerada desprezável. Para a configuração B.2, com a presença de rugosidades foi considerada uma rugosidade, K_s de 0.001 m e um coeficiente de rugosidade, CR, de 0.5.

O ficheiro que corresponde à velocidade é aquele que vai definir o caudal de entrada na simulação. Define-se a velocidade através da equação:

$$U = \frac{Q}{A} \qquad (4.1)$$

Onde Q corresponde ao caudal, U corresponde à velocidade e A corresponde à área de entrada.

Na condição fronteira de entrada da água, *inletWater*, foi considerada na configuração A.1, uma velocidade de 0.250 m/s, na configuração A.2 e B uma velocidade de 0.333 m/s e na configuração A.3 de 0.505 m/s.

Quanto à pressão, visto estarmos na presença de um escoamento em superfície livre, esta foi considerada 0 em todas as condições fronteira.

Os valores de k e ω durante o escoamento foram calculados tendo em conta as fórmulas do modelo de resolução SST k-ω do capítulo 3. Para a definição dos valores de energia cinética turbulenta e de dissipação de energia turbulenta, no momento inicial do escoamento foi necessário utilizar as equações 4.2 e 4.3 e também fazer algumas suposições a nível da intensidade da turbulência e escala de comprimento da turbulência.

A intensidade da turbulência, segundo George (2013), para casos de turbulência intermédia, como é o caso de escoamentos com baixas velocidades, pode ser estimada num intervalo entre 1% e 5%. Para o caso em estudo foi considerada uma intensidade de turbulência de 3%.

A escala de comprimento da turbulência é o comprimento que os turbilhonamentos, ou vórtices conseguem atingir. Visto que o descarregador possui 2.6 m com degraus de largura 0.1 m foi considerado uma escala de 0.05 m para o tamanho que o maior vórtice pode atingir. Esta consideração foi tomada em conta depois de analisar alguns estudos de descarregadores em degraus, nomeadamente os de Savage, Johnson (2001), Chanson (2002) e Cheng *et al* (2004 a).

$$k = \frac{3}{2}(UI)^2 \qquad (4.2)$$

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{3/4} * k^{3/2}}{l} \qquad (4.3)$$

Onde k corresponde à energia cinética turbulenta, U à velocidade do escoamento, I à intensidade da turbulência. ε corresponde à taxa de dissipação da turbulência, C_μ a um coeficiente, que neste caso equivale a 0.09, e l à escala de comprimento da turbulência. É de notar que o valor ω, correspondente à taxa de dissipação da turbulência específica pode ser encontrado através da equação 3.23

Quanto ao valor de energia cinética este foi de $8{,}43*10^{-5}$ m^2/s^2 para a configuração A.1, para a configuração A.2, B.1 e B.2 de 0.0001497 m^2/s^2 e finalmente para a configuração A.3 de 0.000344 m^2/s^2.

Tendo em conta as equações (3.22), (4.2) e (4.3), para os valores de ω foram considerados os valores de 0.1837 s^{-1} para a configuração A.1, 0.2447 s^{-1} para as configurações A.2, B.1 e B.2 e 0.371 s^{-1} para a configuração A.3.

4.8. Controlo da Solução e do Algoritmo

A resolução de equações, tolerâncias e algoritmos são controlados por um ficheiro designado *fvSolution* que está presente na pasta *system*. Este ficheiro contém uma série de subdicionários específicos para que os solucionares sejam executados.

Estes subdicionários são os seguintes:

- Solucionadores Lineares;
- Fatores de Abrandamento;
- Solucionadores Algorítmicos.

Os Solucionadores Lineares têm como principal objetivo a resolução das equações lineares das variáveis do escoamento. Existem vários métodos que se podem utilizar no *OpenFOAM*. Para a resolução da velocidade, energia cinética turbulenta e taxa de dissipação da turbulência foi utilizado o método PBiCG *(Preconditioned (bi-)conjugate gradient).* Sem entrar em grandes especificações, este método é utilizado para matrizes assimétricas e cria matrizes positivas simétricas através da multiplicação e transposição. Apesar da boa precisão dos resultados, esta mesma precisão atrasa a convergência do escoamento fazendo mesmo por vezes com que este não ocorra, Gutknecht, Nachtigal (1993). Por essa razão para os resultados onde a precisão não era tão necessária, o caso da pressão e do deslocamento de células, foi utilizado o método GAMG (*Generalised geometric-algebraic multi-grid*). Este método usa o princípio de gerar uma solução bastante rápida na malha utilizando apenas um pequeno número de células. Após isso, mapeia o resto da malha, utilizando o comportamento encontrado anteriormente para obter os valores mais precisos. Este solucionador é o mais rápido dos apresentados.

Os fatores de abrandamento utilizam parte dos valores de iterações anteriores, para abrandar a solução e assim cortar excessivas oscilações do mesmo cálculo. Pode-se dizer que os fatores de relaxamento limitam a mudança de um valor numa iteração. Quanto menor o valor, mais estável é o escoamento, no entanto, mais a solução demora a convergir. No caso dos problemas simulados utilizaram-se os valores de 0.3 para a pressão, para não haver variações demasiado elevadas na pressão e 0.5 para a variação da velocidade, energia cinética turbulenta e dissipação. Isto significa, que no último caso, a variação de um valor de uma iteração para a seguinte não pode variar mais do que 50% do valor anterior.

Quanto aos solucionadores algorítmicos é possível utilizar 3 tipos diferentes no *OpenFOAM:*

- PISO *(Pressure implicit with splitting of operator*);
- SIMPLE (*Semi implicit method for pressure linked equations*);
- PIMPLE (*Pressure implicit method for pressure linked equations*).

Ambos os algoritmos são procedimentos iterativos em que o campo de pressões é estimado de modo a determinar as componentes de velocidade. No algoritmo SIMPLE, a correção das pressões é efetuada através das equações de movimento e continuidade, e o cálculo efetuado até a solução convergir realizando apenas um cálculo em simultâneo. A opção PISO executa cálculos adicionais relacionados com a correção da pressão considerando a qualidade de cada elemento da malha. Consegue executar até cerca de 4 cálculos em simultâneo fazendo com que a convergência seja mais rápida. O algoritmo PIMPLE pode ser considerado um procedimento PISO com duas opções adicionais, a correção de *loops* e o abrandamento de iterações de variáveis exteriores. Esta adição de fatores faz com que a convergência seja mais eficaz, Ferziger, Peric (2002).

Pelo facto de o algoritmo PIMPLE consistir no algoritmo PISO com algumas melhorias, este foi o escolhido para a resolução dos problemas em estudo.

4.9. Controlo dos Dados

Na análise numérica dos escoamentos é necessário fornecer informação, não só relativamente à discretização no espaço, como também no tempo.

Os solucionadores do *OpenFOAM* criam um ficheiro de dados a um intervalo de tempo designado. Esse intervalo de tempo é definido no ficheiro *controlDict* na pasta *system*. Neste ficheiro definiu-se para todas as configurações um *time-step* máximo de 0.01s, criando pastas de memórias temporais da evolução das variáveis do escoamento também a cada 0.01s. Devido à complexidade da malha este valor esteve muito longe do determinado, conseguindo-se uma média de resolução bastante inferior. Para os descarregadores sem macrorugosidades, na configuração A.1, A.2 e A.3 o *time-step* médio a cada

iteração era de aproximadamente 5×10^{-5} s. Para os descarregadores com rugosidades, o *time-step* médio rondava os 5×10^{-7}s para a configuração B.1 e 2×10^{-6}s para a configuração B.2. Esta diferença de *time steps* indica que devido à presença da rugosidade o *software* necessita de efetuar cálculos com um intervalo de tempo mais pequeno para conseguir encontrar a convergência.

Quanto ao número de *Courant*, segundo o guia de utilização do *OpenFOAM* para alcançar precisão temporal e estabilidade numérica é necessário que este seja menor que 1. O mesmo manual aconselha uma utilização no intervalo entre o 0.2 e 0.5. Como quanto menor número de *Courant* maior é a precisão temporal e sabendo que o time-step das simulações estava bastante pequeno foi utilizado o número *Courant* máximo recomendado, 0.5.

5
RESULTADOS NUMÉRICOS

5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo, apresentam-se os resultados das várias simulações numéricas, realizadas no âmbito desta dissertação, tendo como base os modelos descritos no capítulo anterior. Os resultados serão exibidos em duas fases distintas. Numa primeira fase serão demonstrados os resultados das simulações dos escoamentos nos descarregadores em degraus revestidos em betão e uma comparação entre eles. Numa segunda fase serão apresentados os resultados obtidos dos descarregadores em degraus com a presença da rugosidade e uma comparação com os resultados do descarregador revestido a betão.

5.2. SIMULAÇÕES DE DESCARREGADORES EM DEGRAUS COM REVESTIMENTO EM BETÃO

Após várias tentativas falhadas de simulação de escoamentos, foi possível após várias horas de simulações obter 3 escoamentos diferentes para o descarregador de degraus revestidos em betão. Para cada caso de estudo foram simulados 10s de escoamento. Neste subcapítulo serão abordados as diferentes variáveis do escoamento solucionadas pela modelação numérica e também será efetuada uma comparação entre as diferentes configurações.

O *software OpenFOAM* não possui nenhuma ferramenta que possa efetuar as medições das variáveis ao longo da sua superfície, caso esta não seja totalmente em linha reta. Por essa razão as medições das variáveis foram feitas degrau a degrau. Como a comparação dos resultados dos 26 degraus é desnecessária, apenas foi realizado medições da velocidade e pressão no degrau 2, 13 e 25,para assim acompanhar mais detalhadamente as propriedades do escoamento no início, no meio e no final do descarregador

É importante esclarecer que os resultados analisados neste subcapítulo referem-se ao instante final do escoamento simulado.

5.1.2. REGIMES DE ESCOAMENTO

No capítulo 2 foram apresentados os 3 tipos distintos de escoamento que podem ocorrer num descarregador em degraus: escoamento em quedas sucessivas (EQS), escoamento de transição (TRA) e escoamento deslizante de turbilhões (EDT). Nas Figura 5.1 a 5.3 são apresentados os comportamentos do escoamento, da configuração A.1, A.2 e A.3 respetivamente, modelados pelo *software OpenFOAM*.
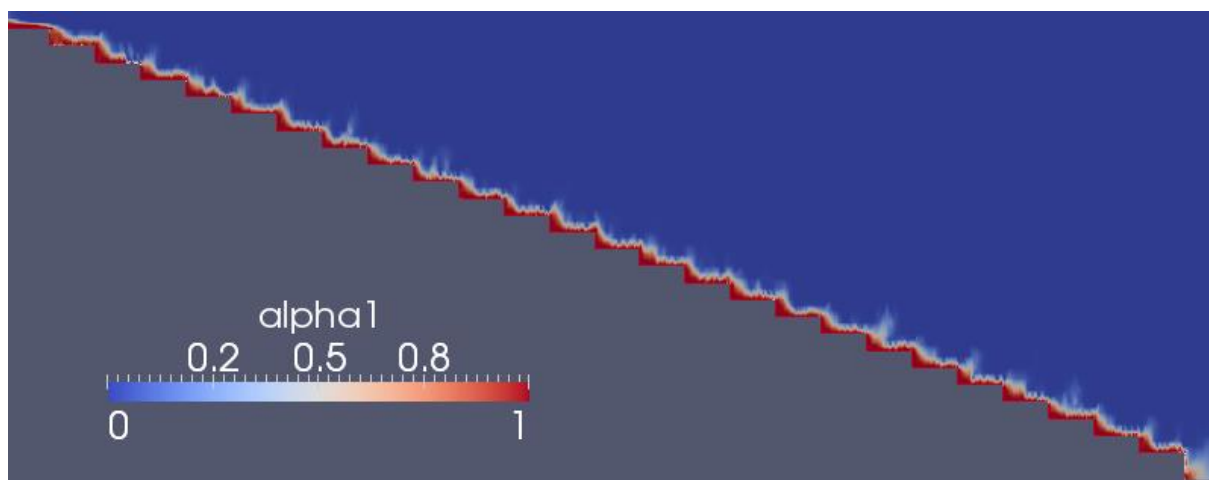
Figura 5.1 - Regime de Escoamento da Configuração A.1
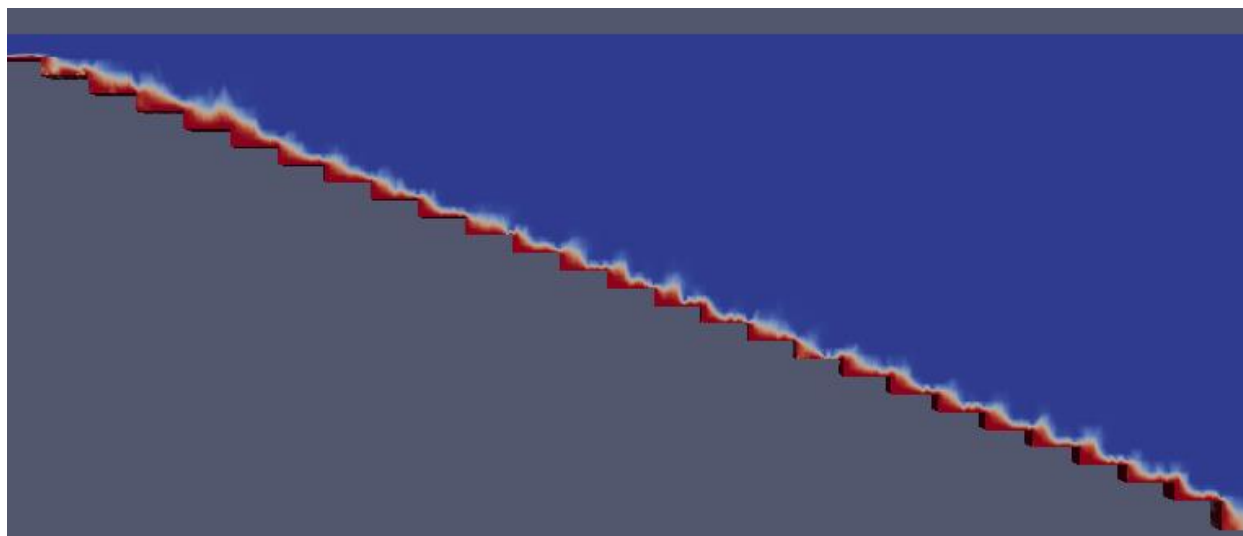
Figura 5.2 - Regime de Escoamento da Configuração A.2
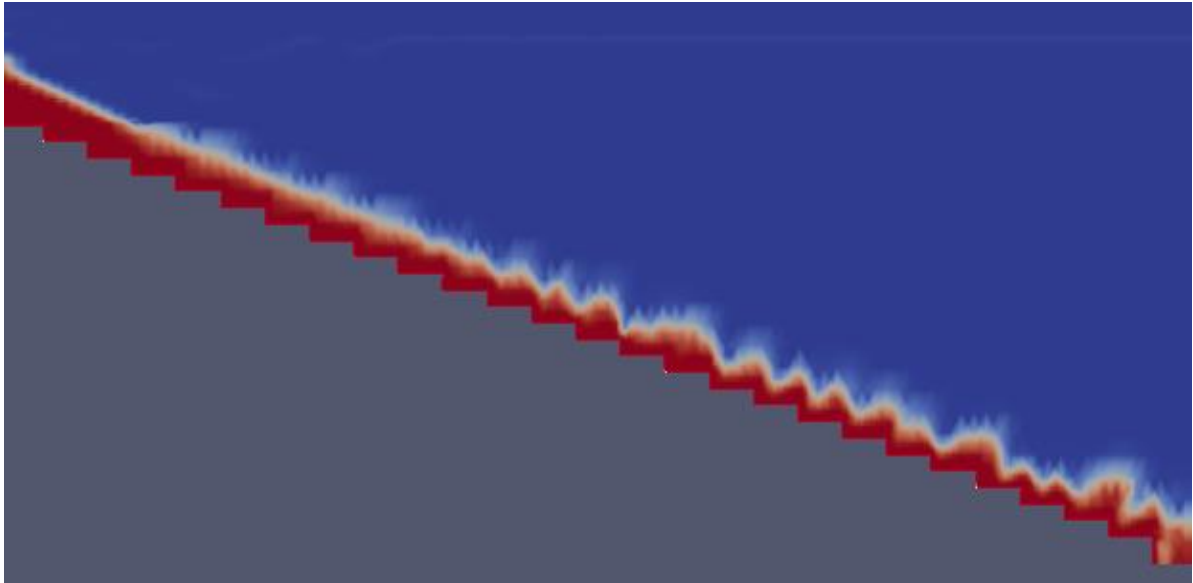
Figura 5.3 - Regime de Escoamento da Configuração A.3

A Figura 5.1 apresenta a formação em cada degrau de uma lâmina líquida que atinge o degrau seguinte total ou parcialmente. Esta característica é típica dos escoamentos em quedas sucessivas. A configuração A.1 é portanto um escoamento que se processa totalmente num escoamento tipo EQS. É importante frisar que segundo Meireles (2011) este escoamento apresenta um comportamento típico de escoamento de transição. Devido à simplificação do modelo do descarregador na simulação este apresenta uma largura constante ao longo do seu canal o que influencia o tipo de escoamento. A mesma situação ocorre para o escoamento verificado na Figura 5.2.

A Figura 5.2 corresponde ao regime de escoamento da configuração A.2. Este tipo de escoamento apresenta algumas semelhanças com o regime de transição a partir do degrau 3. No entanto alguns degraus ainda apresentam algumas características do tipo EQS. Esta dificuldade de identificação deve-se ao escoamento de transição ser de difícil observação. Devido às características dos dois escoamentos pode-se afirmar que este se encontra na fronteira entre o escoamento EQS e o escoamento TRANS.

A Figura 5.3 representa um escoamento deslizante de turbilhões, representado pela configuração A.3.

5.2.2. Alturas do Escoamento

Nas Figura 5.4, 5.5 e 5.6 é possível verificar a superfície livre para a configuração A.1, A.2 e A.3, respetivamente.
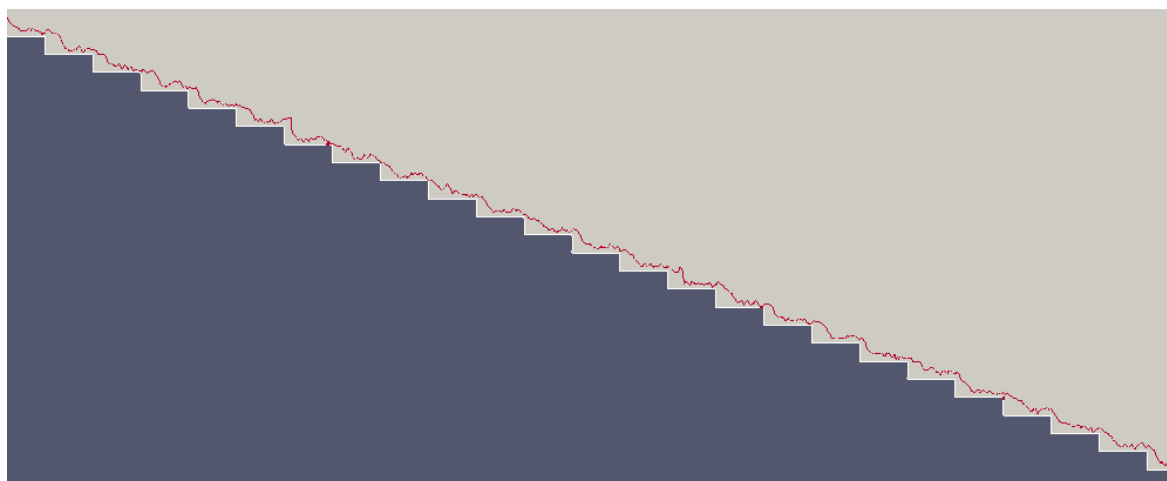
Figura 5.4 - Superfície livre para a Configuração A.1
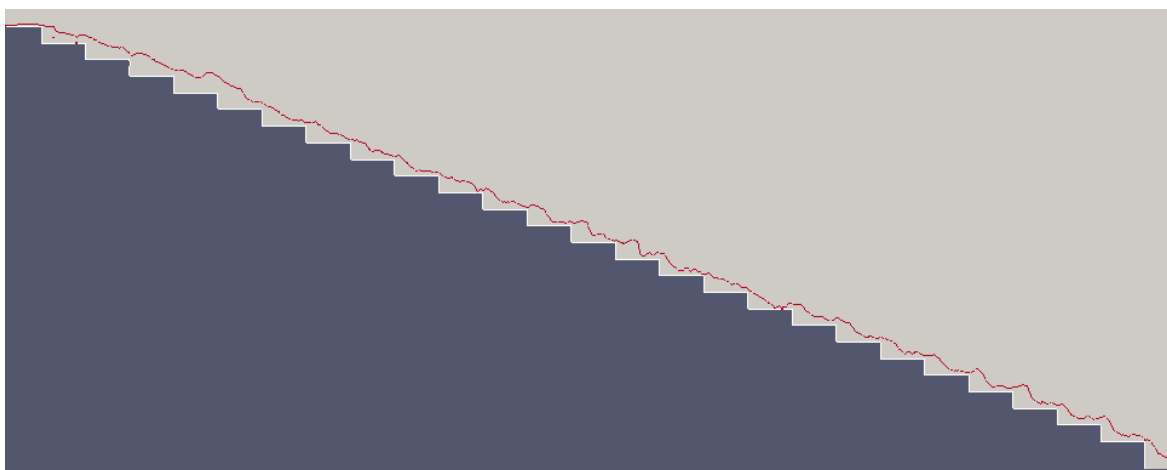
Figura 5.5 - Superfície Livre para a Configuração A.2
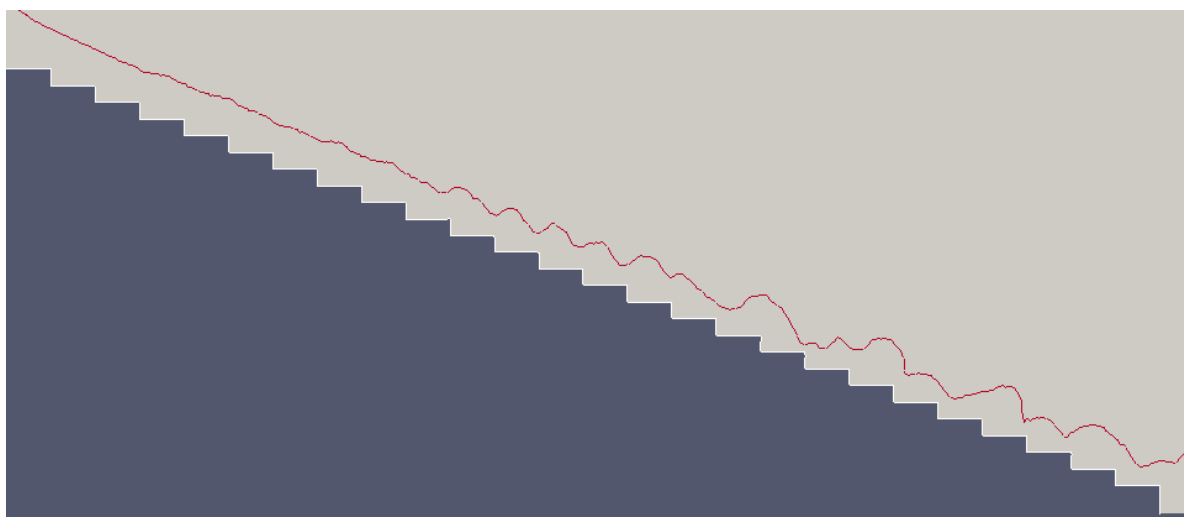
Figura 5.6 - Superfície Livre para a Configuração A.3

Quanto a altura crítica esta pode ser obtida conforme a equação 5.1:

$$d_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 * g}} \qquad (5.1)$$

Onde B representa a largura da secção, Q o caudal e g a aceleração da gravidade.

Para os escoamentos em estudo as alturas críticas podem ser encontradas no Quadro 5.

Quadro 5 - Altura crítica dos escoamentos estudados

	Altura Crítica
Configuração A.1	0.022
Configuração A.2 e B	0.030
Configuração A.3	0.100

5.2.3. Velocidades

As perturbações no campo de velocidades no descarregador em degraus estão presentes na Figura 5.7, Figura 5.8 e Figura 5.9 respetivamente, para a configuração A.1, A.2 e A.3.
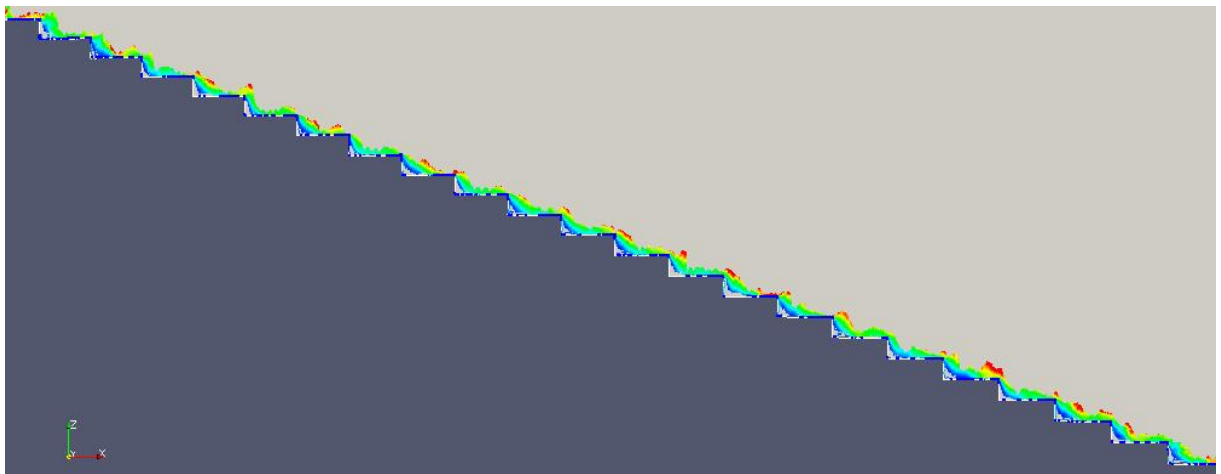
Figura 5.7 - Campo de Velocidades do Escoamento da Configuração A.1
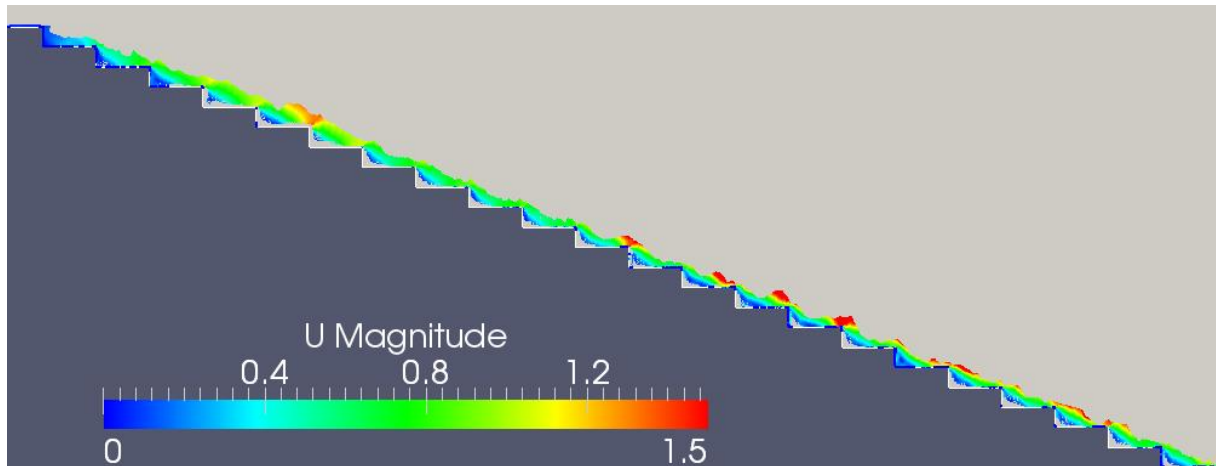
Figura 5.8 - Campo de Velocidades do Escoamento da Configuração A.2
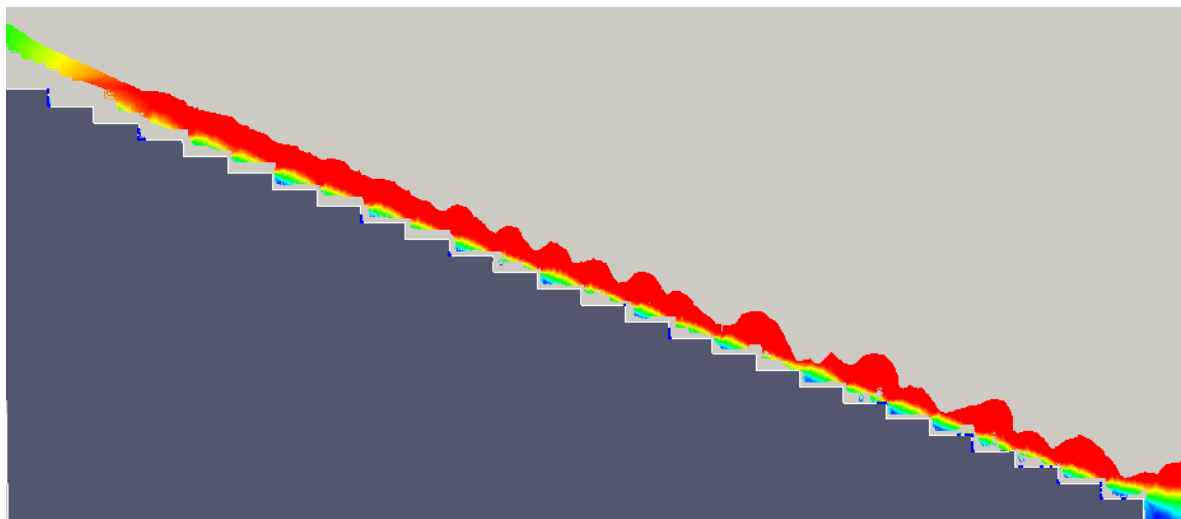
Figura 5.9 - Campo de Velocidades do Escoamento da Configuração A.3

Como é possível verificar nas três configurações, as velocidades superiores observam-se à superfície do escoamento, devido ao emulsionamento de ar aí existente. Tal como foi abordado no capítulo 2 desta dissertação, este facto é esperado porque o escoamento com arrastamento de ar não está tão sujeito a fricção das fronteiras (Lobosco *et al*, 2011).

No estudo das figuras representantes do campo das velocidades é possível verificar a presença de vórtices no canto dos degraus. Estes apresentam um diâmetro maior no escoamento em turbilhões, como se pode verificar na Figura 5.9. Os vórtices são os locais onde ocorre a recirculação do escoamento e onde existe uma concentração de ar. Na Figura 5.10 é possível ver em pormenor a trajetória do escoamento tal como as suas velocidades nesse local.
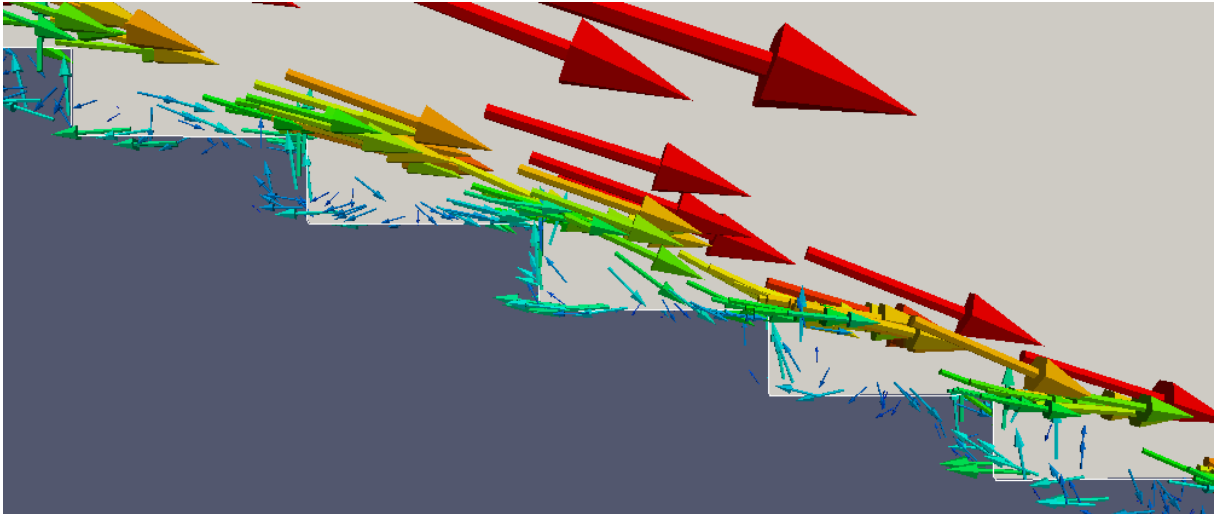
Figura 5.10 - Trajetória e Velocidade do Escoamento no degrau 12 da Configuração A.3

Nas Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 não se consegue ter a noção da variação da velocidade no fundo dos degraus devido aos vórtices. Para a perceção da progressão da velocidade ao longo dos degraus, analisou-se graficamente, os degraus 2, 13 e 25 das 3 configurações A.1. A.2 e A.3 (Figura 5.11, Figura 5.12 e Figura 5.13)
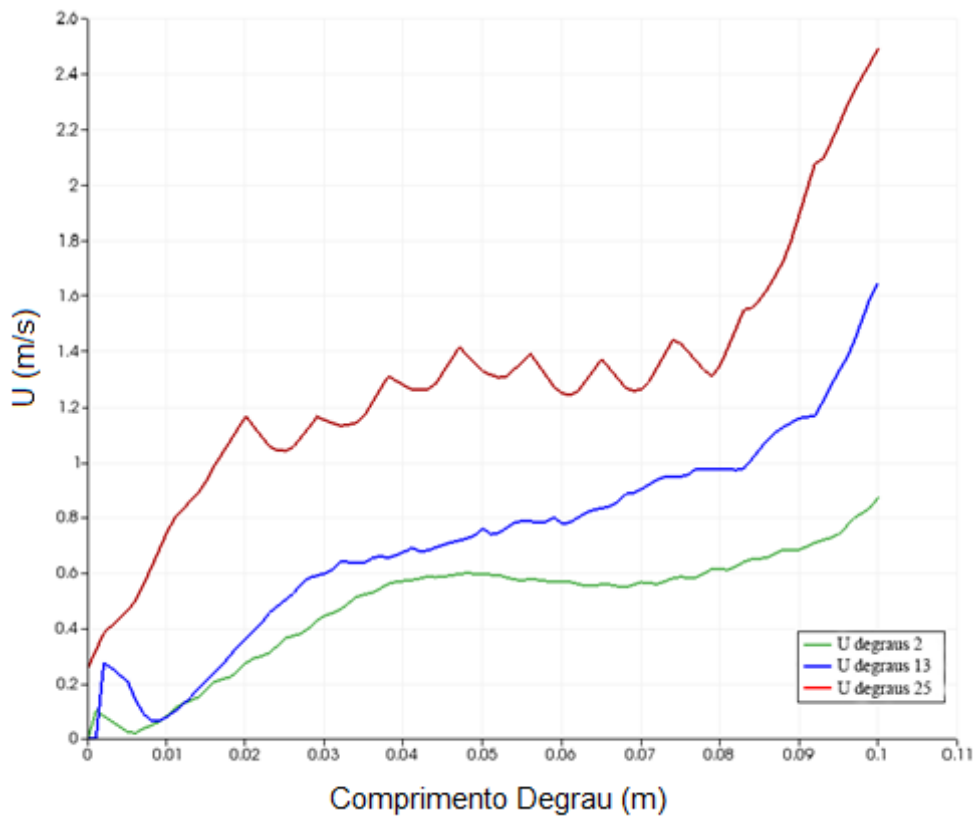
Figura 5.11 - Velocidade no fundo dos degraus da configuração A.1
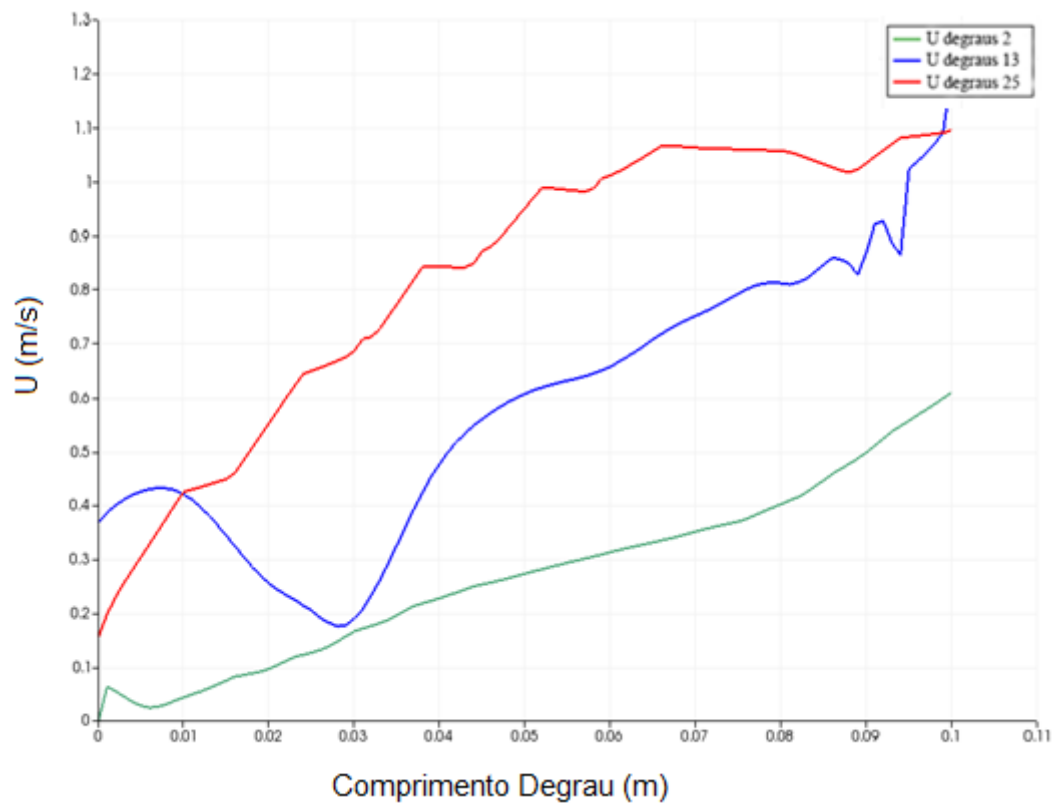
Figura 5.12 - Velocidade no fundo dos degraus da configuração A.2
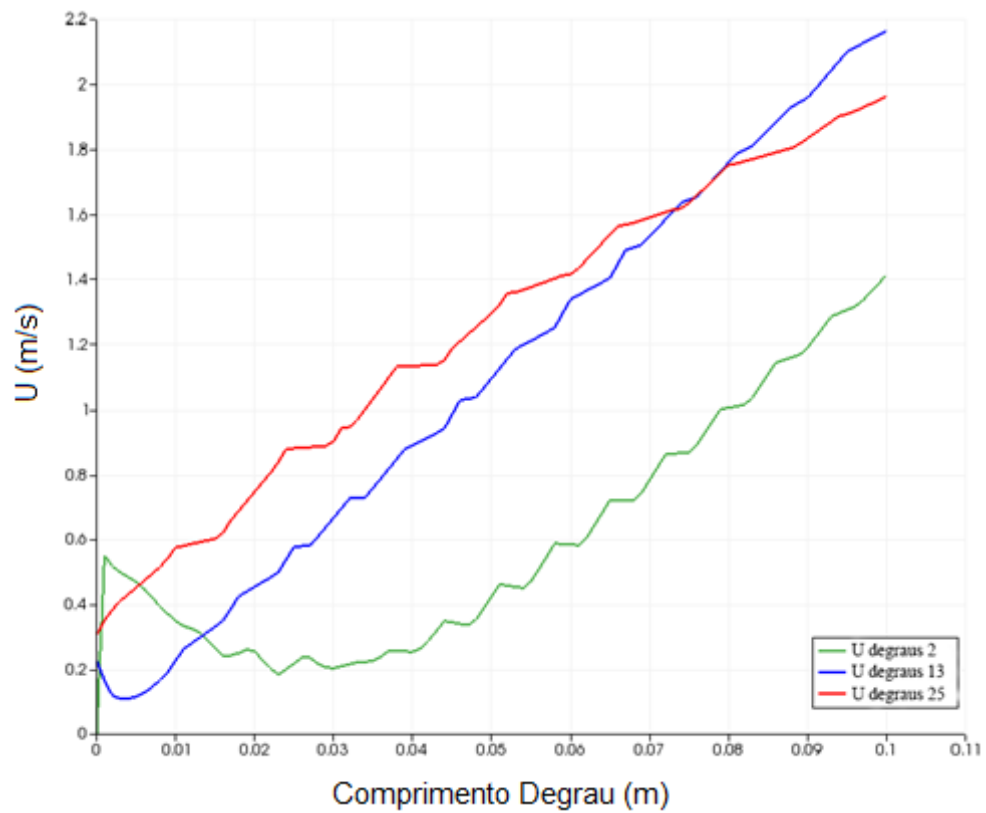
Figura 5.13 - Velocidade no fundo dos degraus da configuração A.3

De um modo geral consegue-se verificar que as velocidades aumentam ao longo do escoamento. Quanto à velocidade ao longo do degrau, esta vai aumentando progressivamente. Isto deve-se à presença dos vórtices nos cantos dos degraus. Estes criam uma recirculação do escoamento, o que por consequência provoca uma baixa velocidade nesse local.

Na configuração A.1, como se trata de um escoamento tipo EQS, a subida brusca da velocidade a partir dos 0.09m, deve-se a este ter entrado em contacto brevemente com o escoamento de ar.

5.2.4. PRESSÃO

A análise da distribuição das pressões ao longo de um descarregador em degraus é importante devido ao risco de cavitação que este tipo de descarregadores é propenso.

As pressões obtidas ao longo dos escoamentos podem ser observadas nas Figuras 5.14, 5.15 e 5.16
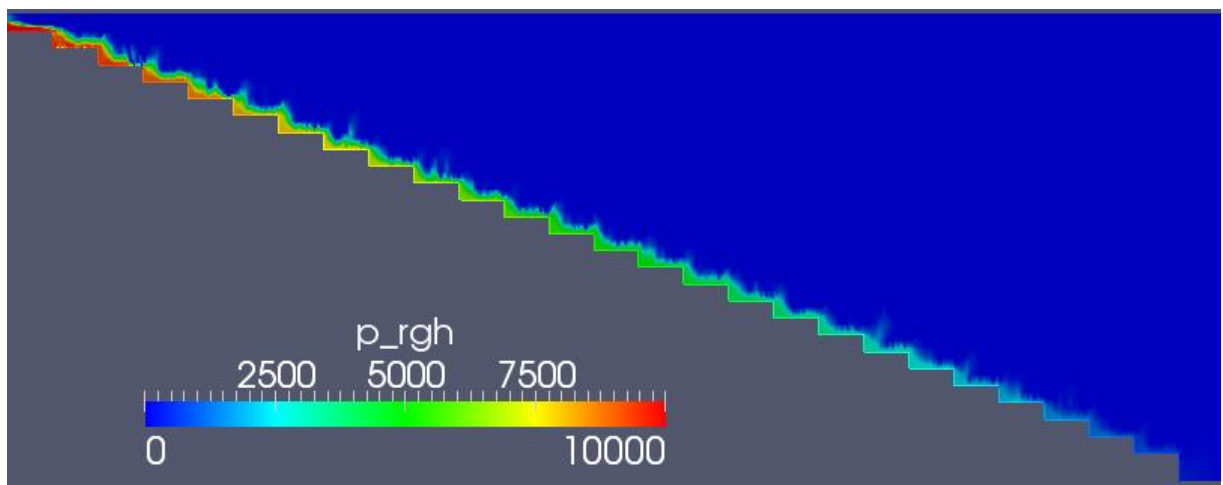
Figura 5.14 - Distribuição da Pressão ao longo do Escoamento na Configuração A.1
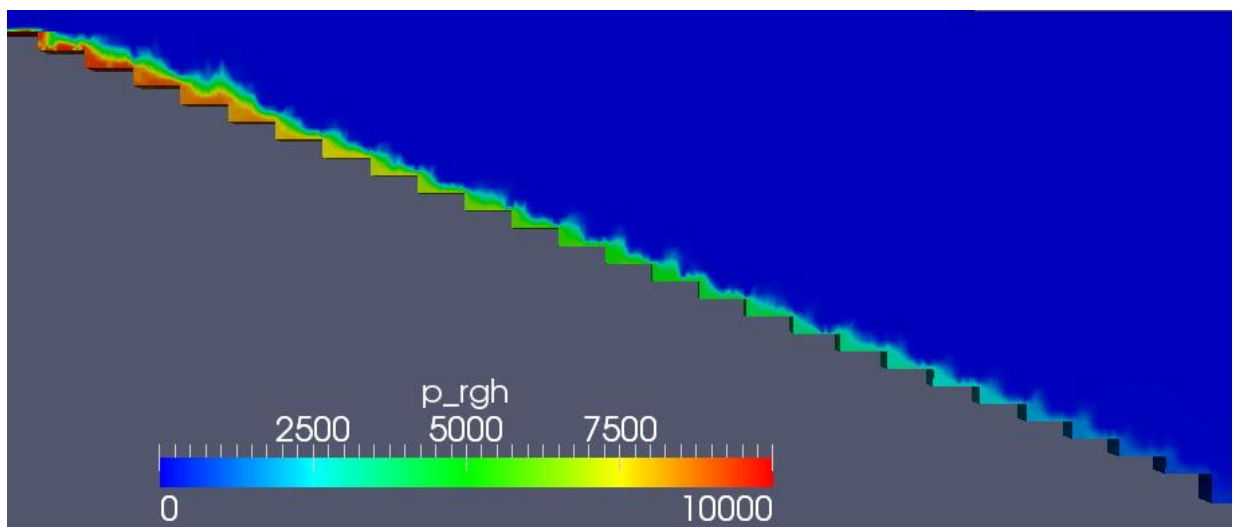
Figura 5.15 - Distribuição da Pressão ao longo do Escoamento na Configuração A.2
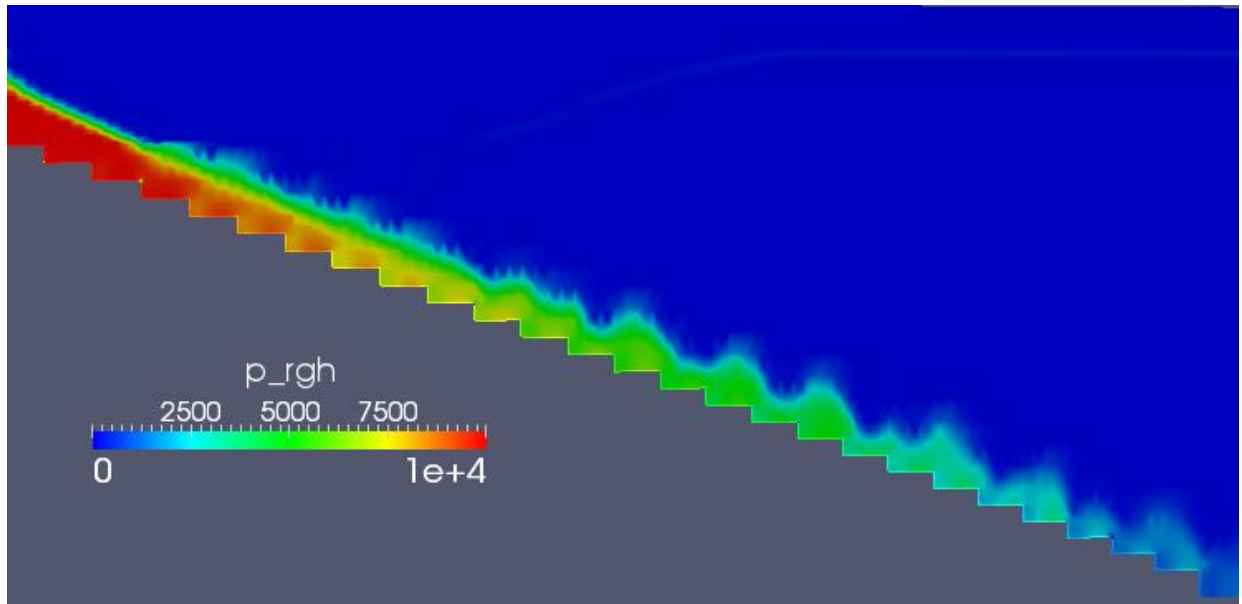
Figura 5.16 - Distribuição da Pressão ao longo do Escoamento na Configuração A.3

Como é possível verificar, à medida que o escoamento evoluiu, a pressão vai diminuindo constantemente. Este resultado é mais que esperado devido à perda de energia que o escoamento sofre ao longo do descarregador. No entanto há que ter em atenção às pressões de fundo, que devido à recirculação do escoamento no canto inferior esquerdo dos degraus pode levar a quedas abruptas de pressão.

Nas Figuras 5.17, 5.18 e 5.19 podem ser encontrados a variação da pressão no fundo dos degraus 2, 13 e 25 para os escoamentos em estudo.
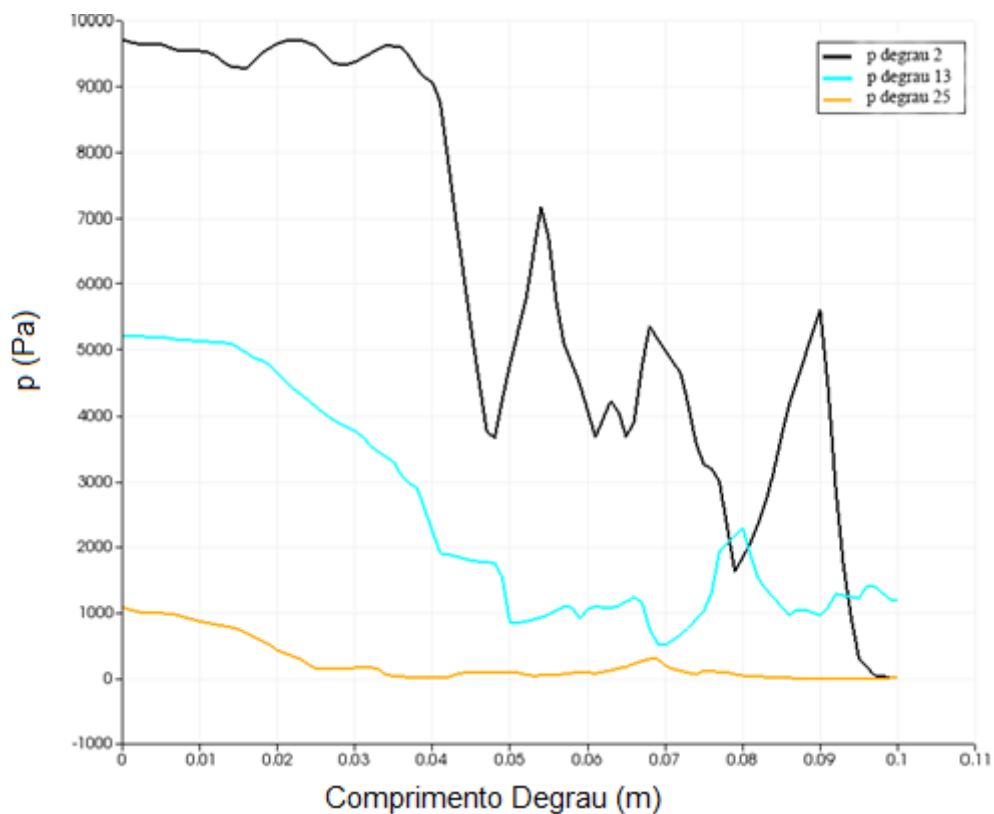
Figura 5.17 - Pressão no fundo dos degraus da configuração A.1
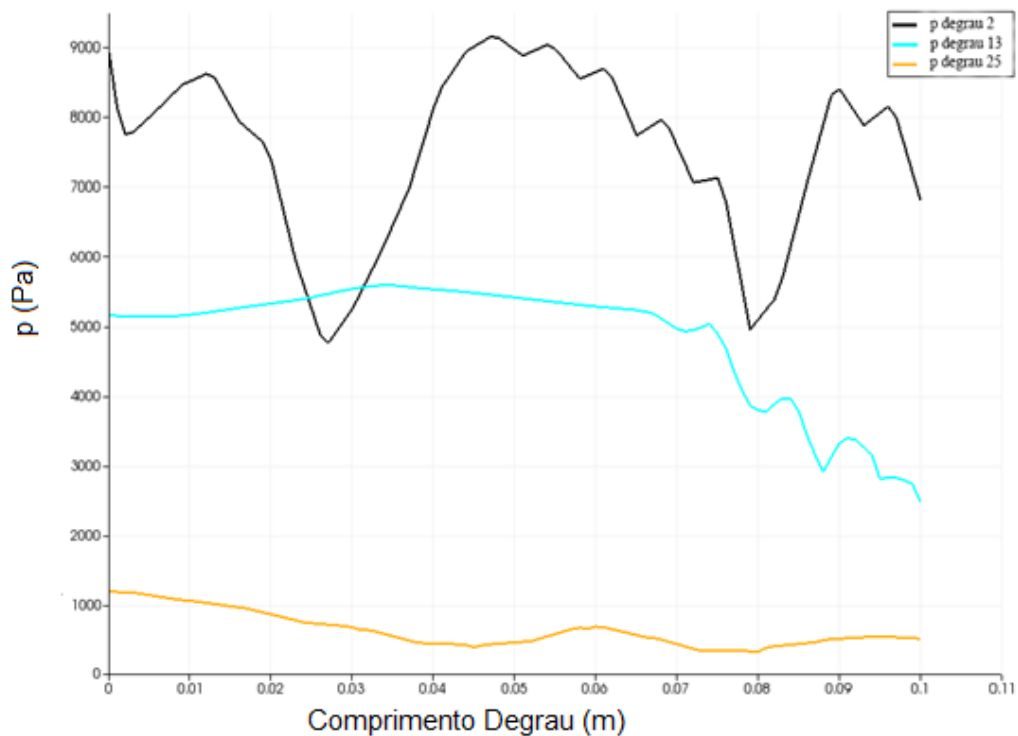
Figura 5.18 - Pressão no fundo dos degraus da configuração A.2
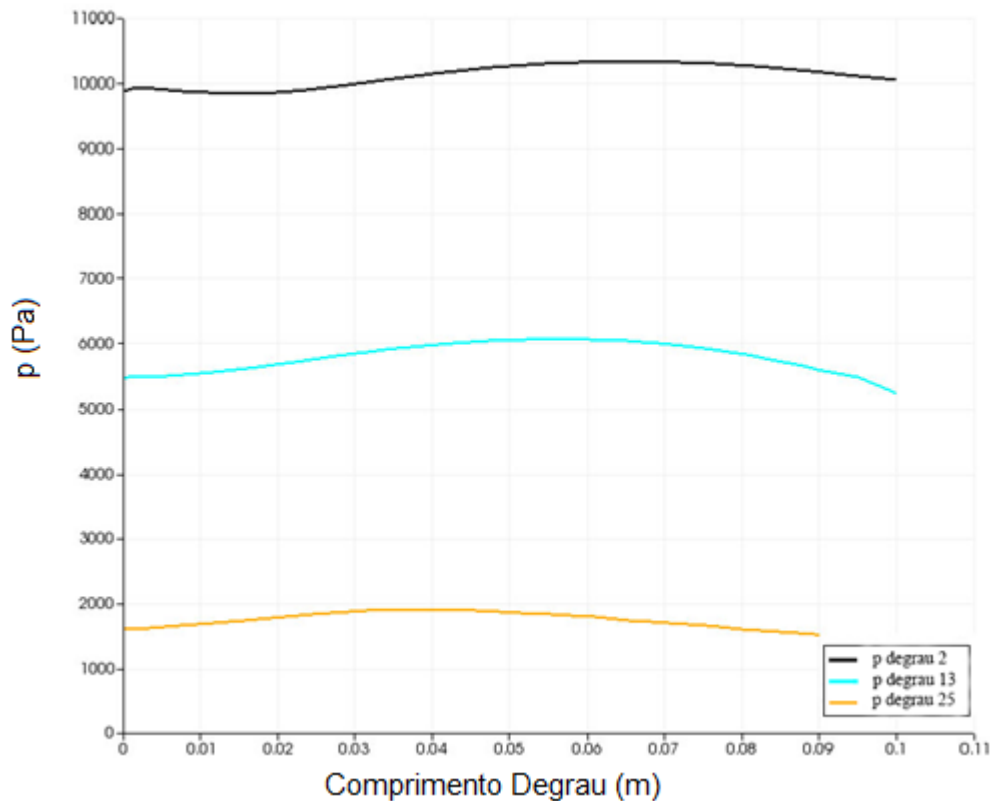
Figura 5.19 - Pressão no fundo dos degraus da configuração A.3

O escoamento em questão foi simulado para uma temperatura padrão de 20ºC, isso significa que a sua pressão de vaporização ocorre por volta dos 2300 Pa.

Na situação em estudo é possível observar que no degrau 2 da configuração A.1, Figura 5.17, existe flutuações abruptas de pressão, aos 0.08m, a pressão cai até aos 2000 Pa para voltar a subir abruptamente. Para esta situação é necessário algum estudo para verificar as consequências destas flutuações de pressões. Realça-se igualmente, que devido aos vórtices de grandes dimensões da configuração A.3., a pressão no fundo dos degraus mantem-se relativamente constante.

5.2.5. Análise Comparativa das Velocidades do Modelo Numérico com as Velocidades Laboratoriais

Meireles (2011) realizou testes laboratoriais para o descarregador em estudo. Os resultados que obteve podem ser observados no Quadro 6.

Quadro 6 - Comparação das Velocidades Obtidas nos Trabalhos Laboratoriais e Modelação Numérica

Degrau	Q=2,32 l/s				Q=1,49 l/s			
	d_c (m)	U_{Modelo} (m/s)	$U_{Laboratorio}$ (m/s)	Diferença	d_c (m)	U_{Modelo} (m/s)	$U_{Laboratorio}$(m/s)	Diferença
1	0,046	0,336	0,424	21%	0,025	0,400	0,424	6%
2	0,020	0,781	-	-	0,013	0,800	-	-
3	0,026	0,602	1,093	45%	0,012	0,833	1,093	24%
4	0,017	0,921	1,121	18%	0,012	0,870	1,121	22%
5	0,014	1,105	1,196	8%	0,013	0,769	1,196	36%
6	0,018	0,836	1,167	28%	0,010	0,952	1,167	18%
7	0,015	1,031	1,260	18%	0,010	1,000	1,126	11%
8	0,014	1,067	1,352	21%	0,007	1,333	1,352	1%
9	0,011	1,406	1,300	-8%	0,008	1,250	1,300	4%
10	0,010	1,473	1,379	-7%	0,009	1,053	1,379	24%
11	0,012	1,289	1,389	7%	0,012	0,833	1,389	40%
12	0,012	1,237	1,289	4%	0,010	0,952	1,289	26%
13	0,008	1,933	1,510	-28%	0,009	1,111	1,510	26%
14	0,008	1,820	1,472	-24%	0,011	0,870	1,472	41%
15	0,012	1,289	-	-	0,009	1,111	-	-
16	0,012	1,237	1,426	13%	0,010	0,952	1,426	33%
17	0,013	1,163	1,418	18%	0,011	0,909	1,418	36%
18	0,012	1,237	1,503	18%	0,010	0,952	1,503	37%
19	0,013	1,190	1,522	22%	0,013	0,769	1,522	49%
20	0,014	1,067	1,422	25%	0,012	0,800	1,422	44%
21	0,011	1,406	1,480	5%	0,012	0,833	1,480	44%
22	0,013	1,146	1,349	15%	0,010	0,952	1,349	29%
23	0,012	1,289	1,599	19%	0,010	1,000	1,599	37%
24	0,013	1,146	1,512	24%	0,010	0,952	1,512	37%
25	0,015	1,031	1,462	29%	0,011	0,909	1,462	38%
26	0,015	0,998	1,641	39%	0,015	0,645	1,641	61%

Meireles (2011) utilizou um piezómetro para medir a altura do escoamento na extremidade dos degraus, As alturas retiradas do modelo numérico foram retiradas na mesma extremidade à distância de 0.95m. A percentagem de diferença entre os dois descarregadores pode ser observada no Quadro 6.

As diferenças apresentáveis justificam-se pela simplificação do modelo do descarregador. Enquanto o modelo físico contém paredes convergentes, no modelo utilizado para a modelação numérica foi sempre considerado largura constante. É possível observar que no modelo com Q=1.49 l/s a partir do degrau 13 (onde a convergência do modelo 13 termina) começa a existir uma diferença constante entre velocidades de 40%. O mesmo ocorre para o escoamento de Q=2.32 l/s com uma diferença na ordem dos 20%. Durante a convergência do descarregador não foi possível encontrar padrão para comparação, devido a nesse troço o modelo simulado apresentar largura constante tornando impossível a comparação dos resultados.

5.3. Simulações de Descarregadores em Degraus com Rugosidade

A configuração B.1. e B.2. têm como objetivo a simulação de diferentes tipos de rugosidade- A configuração B.1.representa um descarregador composto com macrorugosidades acentuadas que pretende simular um descarregador em degraus escavado diretamente da rocha. A configuração B.2. apresenta uma rugosidade constante de 1 mm na sua soleira e nas paredes.

Devido à presença de rugosidades elevadas ao longo do descarregador, a simulação torna-se mais morosa a nível de processamento e bastante mais instável. Tal como já indicado no capítulo anterior os time-steps médios conseguidos para estas simulações rondaram os 5×10^{-7} para o descarregador com a presença de macrorugosidades e de 2×10^{-6} para o descarregador com a presença de microrugosidades. Essas razões levaram a que apenas fosse possível simular cerca de 2 segundos de escoamento para a configuração B.1 e cerca de 5 segundos de escoamento para a configuração B.2. Apesar de 2 segundos não ser o tempo ideal necessário para tirar conclusões sólidas, permite-nos ter uma informação suficiente para tirar conclusões a nível do comportamento inicial de escoamento.

5.3.1. Aspeto dos escoamentos

Nas Figura 5.20 e Figura 5.21 é possível observar o comportamento da configuração B.1 para os 2 segundos de escoamento assim como a sua respetiva superfície livre. Na Figura 5.22 e Figura 5.23 o comportamento e superfície livre são apresentados para a configuração B.2.
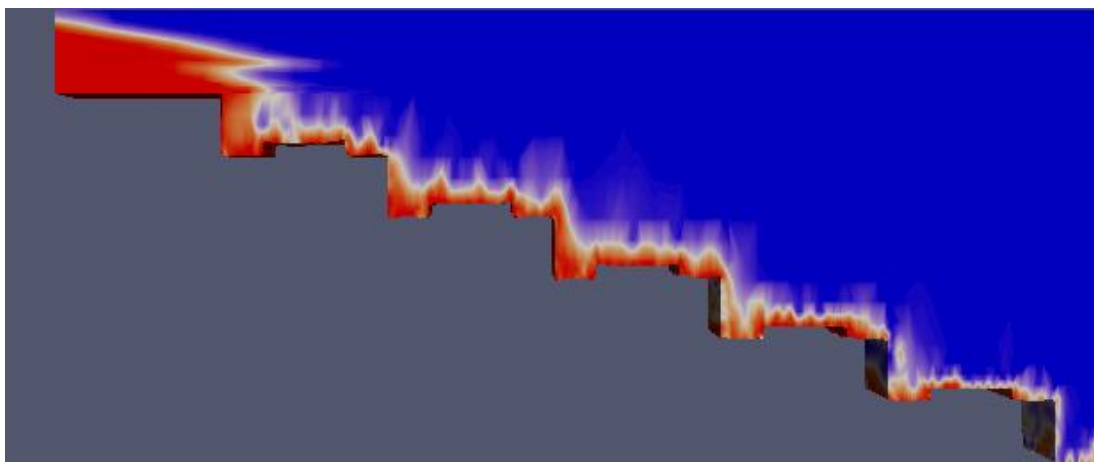
Figura 5.20 - Regime de escoamento da configuração B.1 para 2 segundos de simulação
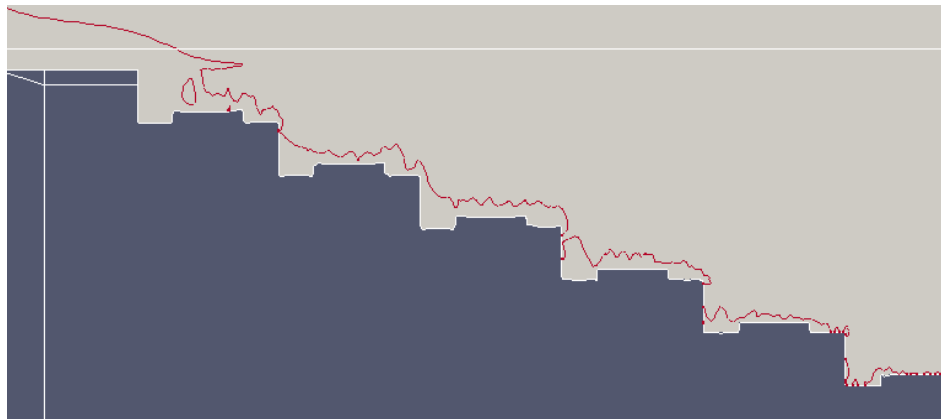
Figura 5.21 - Superfície Livre do escoamento B.1 para 2 segundos de simulação
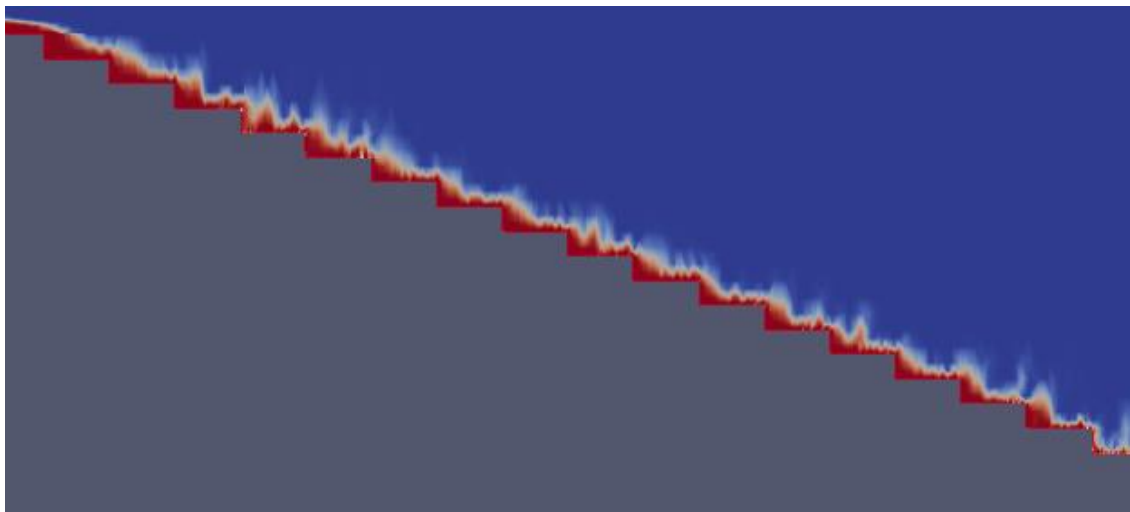
Figura 5.22 - Regime de escoamento da configuração B.2 para 5 segundos de simulação
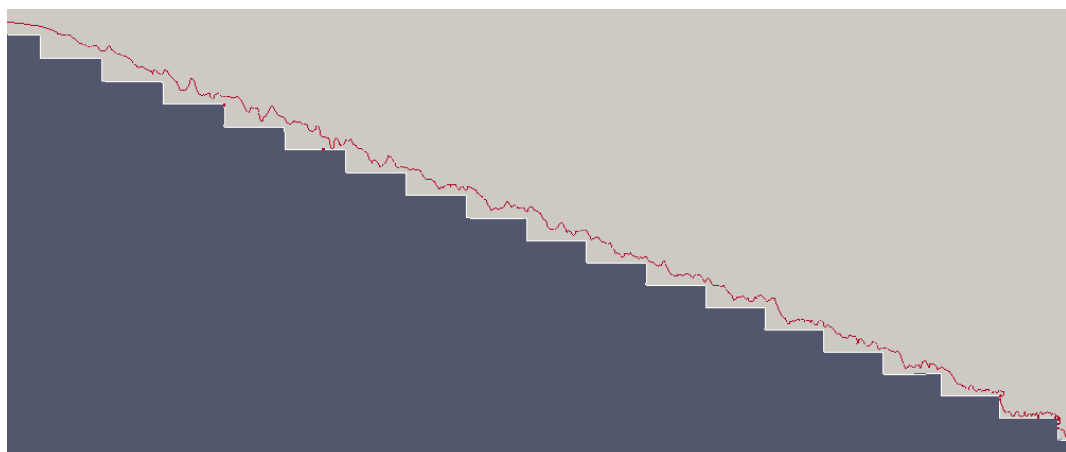
Figura 5.23 - Superfície Livre do escoamento B.2 para 5 segundos de simulação

5.3.2. VELOCIDADES

Nas Figuras 5.24, 5.25 e 5.26 é possível verificar o comportamento da velocidade dos escoamentos da configuração B.1, B.2 e A.2 para o tempo de 2 segundos, respetivamente.
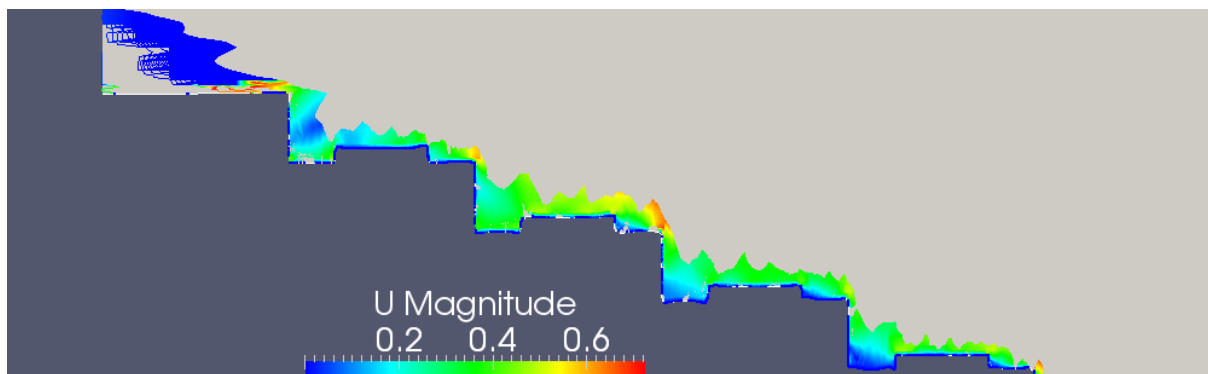
Figura 5.24 - Pormenor da velocidade em m/s na configuração B.1. para 2 segundos de escoamento
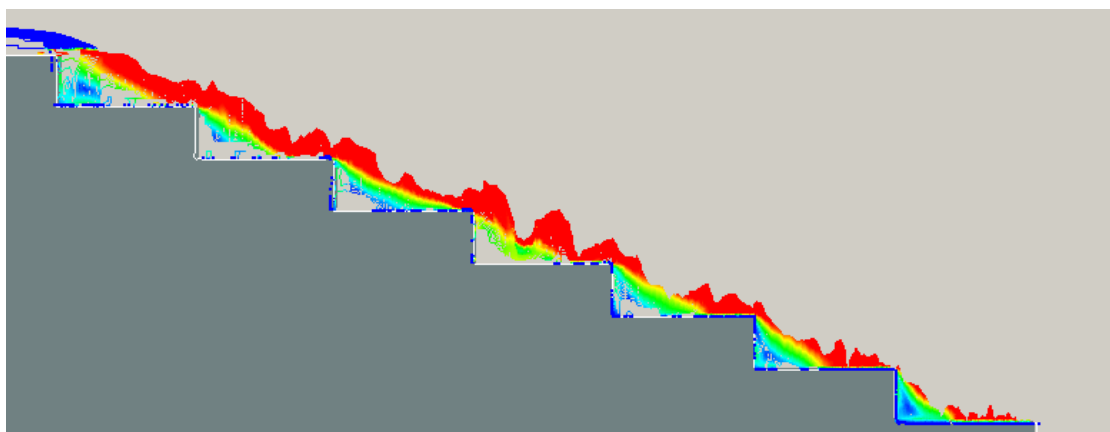
Figura 5.25 - Pormenor da velocidade em m/s na configuração B.2. para 2 segundos de escoamento
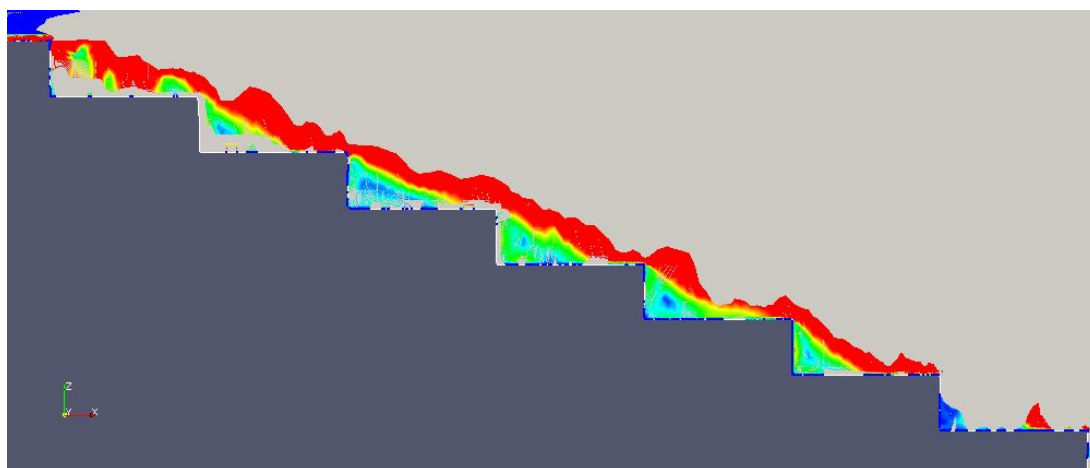
Figura 5.26 - Pormenor da velocidade em m/s na configuração A.2. para 2 segundos de escoamento

Nas figuras anteriores observa-se que apesar de o caudal ser igual nas 3 simulações em estudo, os escoamentos apresentam comportamentos um pouco distintos a nível de velocidades. A configuração

B.1 não apresenta vórtices de grandes dimensões nos cantos dos degraus. Este fator justifica-se devido à macrorugosidade estar próximo do canto do degrau. Esta altera o trajeto do escoamento, fazendo com que nessa zona não haja tendência à recirculação e, por consequência, que as velocidades sejam mais rápidas nesse local quando comparando com as outras configurações. Para rugosidades de pequena dimensão ocorre o inverso. A rugosidade afeta a velocidade levando à criação de vórtices mais rapidamente, mas com um menor tamanho. Na Figura 5.25 e Figura 5.26 é possível verificar que para o mesmo caudal, a configuração B.2 apresenta velocidades menores, quando comparado com o descarregador sem a presença de rugosidade, para os mesmos degraus. Analisando graficamente o fundo dos degraus é possível verificar essa situação.
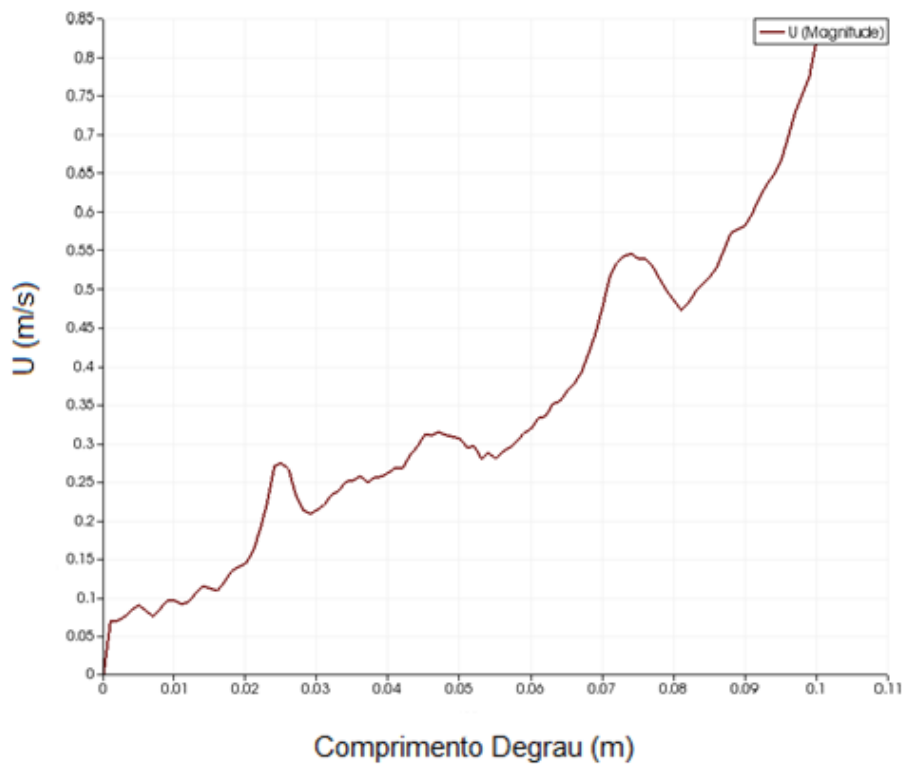
Figura 5.27 - Velocidade no fundo do 2º degrau da configuração B.1 para o escoamento aos 2 segundos
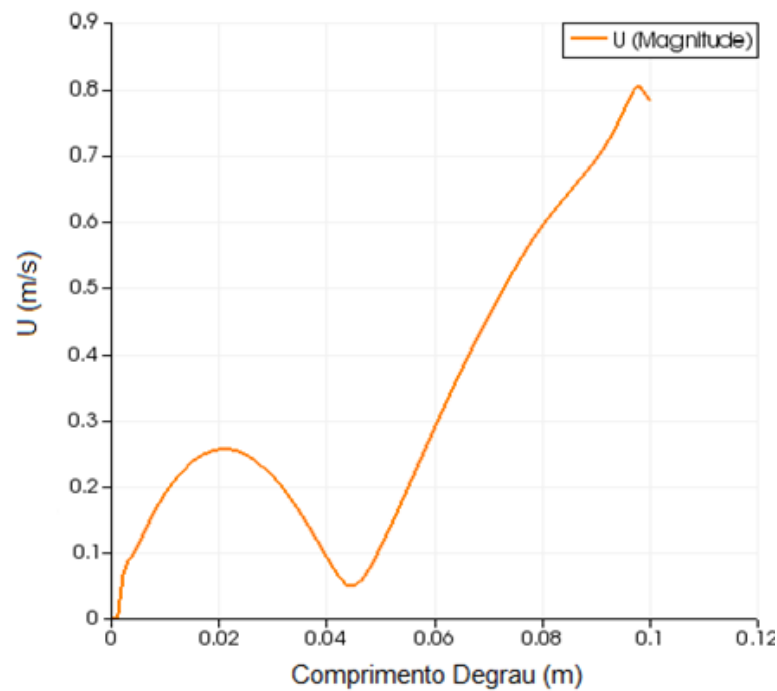
Figura 5.28 - Velocidade no fundo do 2º degrau da configuração B.2 para o escoamento aos 2 segundos
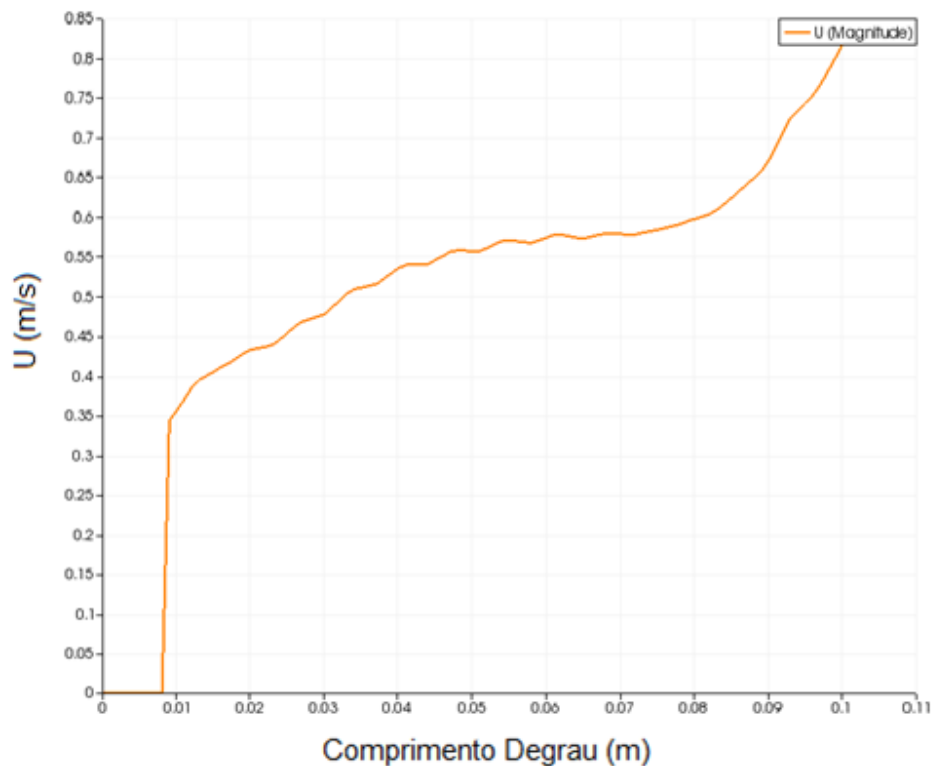
Figura 5.29 - Velocidade no fundo do 2º degrau da configuração A.2 para o escoamento aos 2 segundos

Pode-se verificar que os degraus com rugosidade apresentam uma progressão da velocidade mais constante à medida que o escoamento se dirige para a extremidade. Esta situação é justificada pelos vórtices de menor dimensão que se encontram nos escoamentos com rugosidade. Isto porque são criados

vários vórtices de pequena dimensão entre as rugosidades e a recirculação de grandes dimensões tem maior dificuldade a ocorrer.

5.3.3. PRESSÃO

As pressões obtidas ao longo do escoamento para os 2 segundos de escoamento podem ser analisadas nas Figura 5.30, Figura 5.31 e Figura 5.33
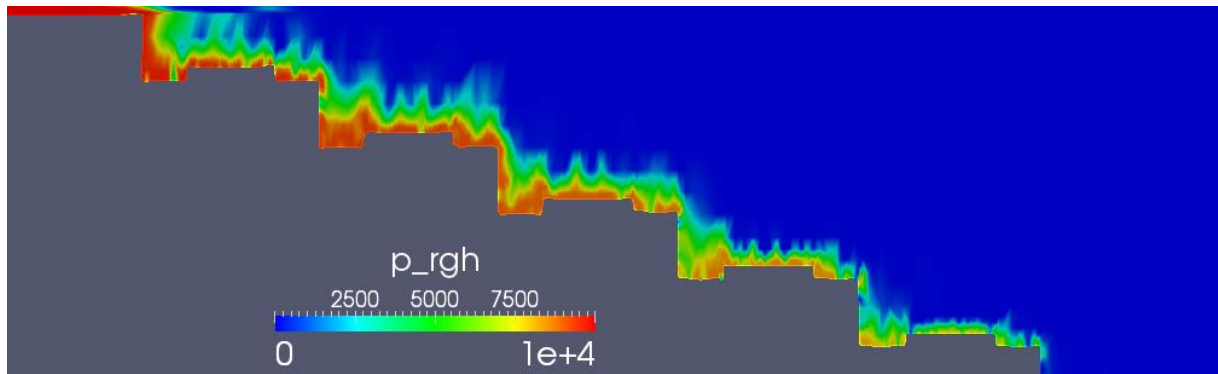
Figura 5.30 – Pormenor da pressão na configuração B.1 para o escoamento aos 2 segundos
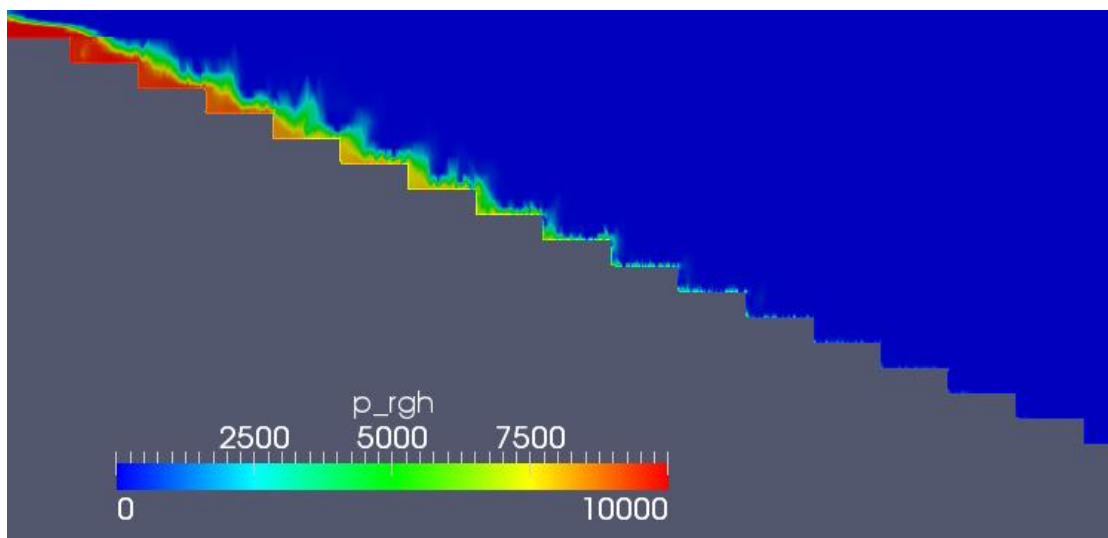
Figura 5.31 - Pressão na configuração B.2 para o escoamento aos 2 segundos

Na Figura 5.30, correspondente à configuração B.1, é possível analisar que a variação das pressões é bastante inconstante. Existe pressões baixas perto das paredes voltando a subir novamente, isso é algo que necessita de especial atenção devido aos problemas possíveis de cavitação. Numa análise das pressões na base do degrau 2, Figura 5.32 e Figura 5.33, é possível verificar uma oscilação de pressões.
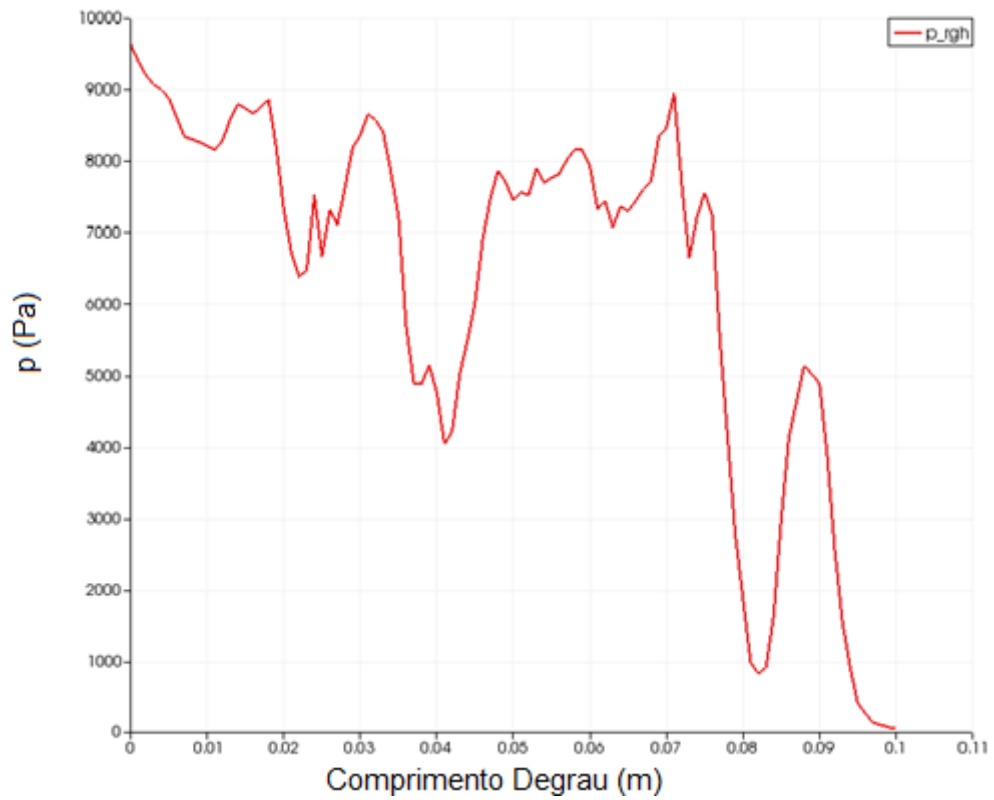
Figura 5.32 - Pressão no fundo do 2º degrau da configuração B.1 para o escoamento aos 2 segundos
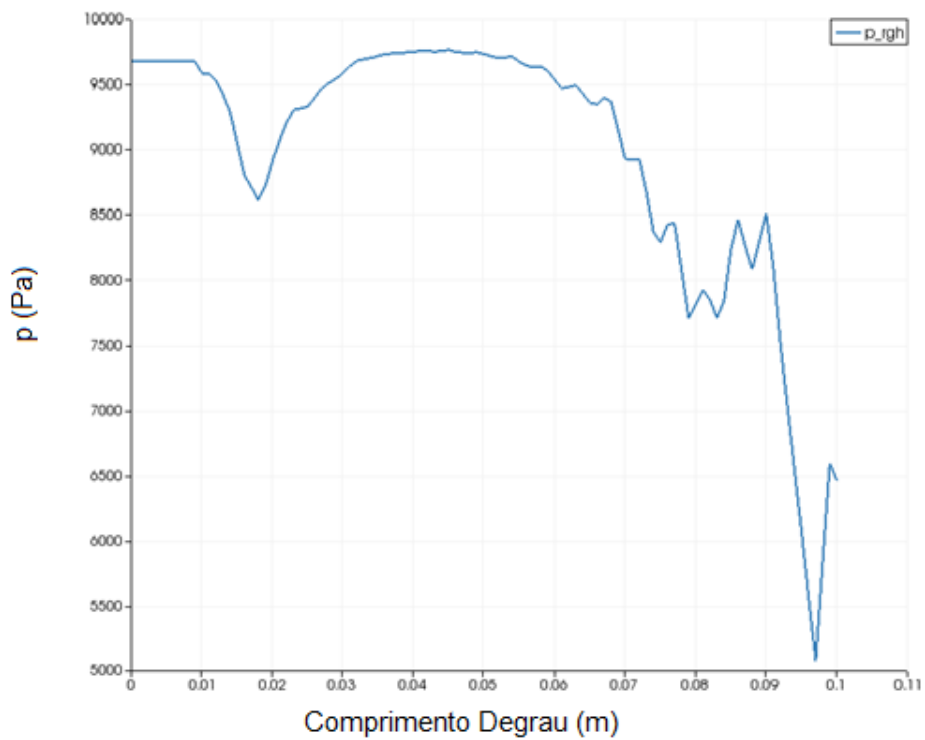
Figura 5.33 - Pressão no fundo do 2º degrau da configuração B.2 para o escoamento aos 2 segundos

Comparando aos 5 segundos de simulação, a variação da pressão ao longo do descarregador da configuração A.2. e da configuração B.2, obtemos as Figura 5.34 e Figura 5.35:
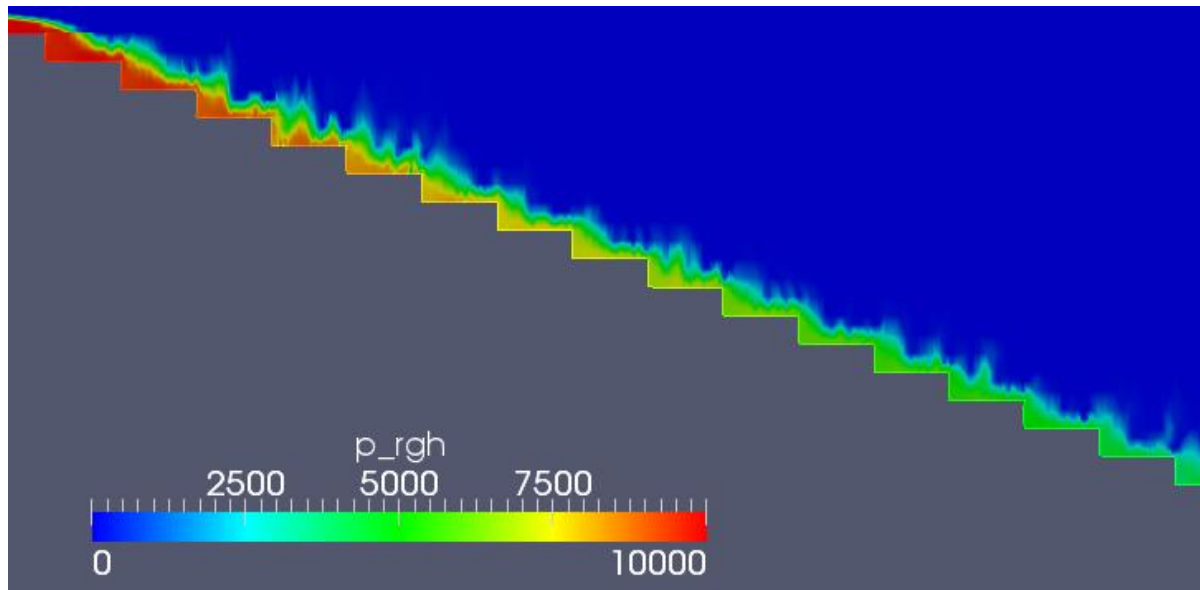
Figura 5.34 - Pressão na configuração B.2 para 5 segundos de simulação
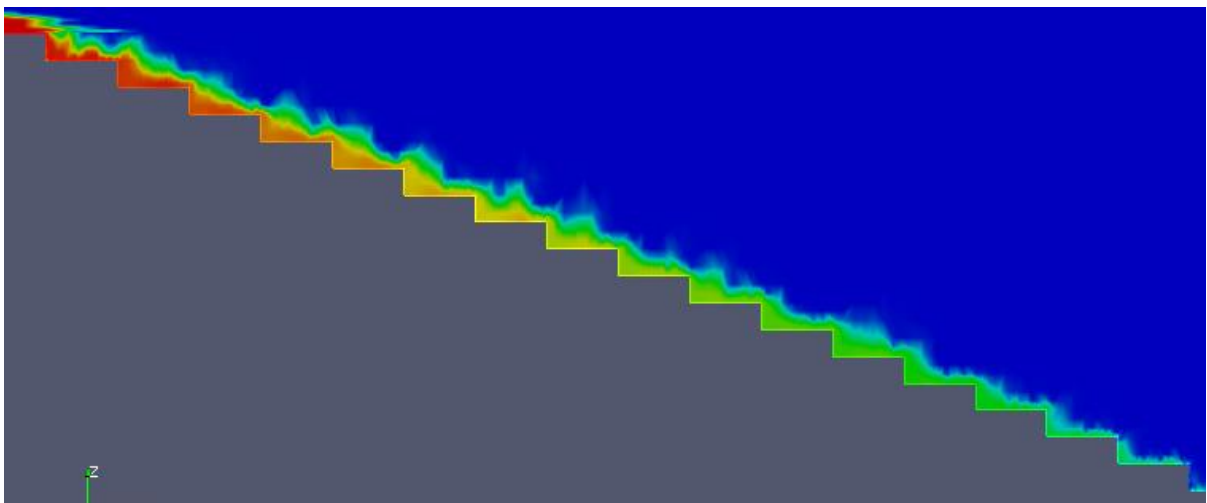
Figura 5.35 - Pressão na configuração A.2 para 5 segundos de simulação

Analisando as figuras anteriores é possível confirmar que um escoamento com paredes rugosas apresenta quedas da pressão mais rapidamente do que o mesmo escoamento em paredes lisas.

5.3.4. COMPARAÇÃO

Quadro 7 - Comparação das Velocidades Obtidas nos Trabalhos Laboratoriais e Modelação Numérica

Degraus	$U_{laboratorio}$ (m/s)	Descarregador Micro Rugosidades			Descarregador Macro Rugosidades		
		d_c (m)	U_{Modelo} (m/s)	Diferença	d_c (m)	U_{Modelo} (m/s)	Diferença
1	0,45	0,023	0,672	33%	0,025	0,619	27%
2	0,497	0,017	0,910	45%	0,012	1,289	61%
3	-	0,016	0,967	-	0,010	1,531	-
4	0,538	0,023	0,687	22%	0,013	1,190	55%
5	0,559	0,031	0,499	-12%	0,010	1,547	64%
6	0,585	0,027	0,571	-3%	-	-	-
7	0,587	0,026	0,595	1%	-	-	-
8	0,596	0,019	0,793	25%	-	-	-
9	0,629	0,018	0,850	26%	-	-	-
10	0,652	0,022	0,687	5%	-	-	-
11	-	0,019	0,810	-	-	-	-
12	0,773	0,017	0,910	15%	-	-	-
13	0.902	0,020	0,773	-17%	-	-	-

No Quadro 7 é possível verificar as alturas obtidas por Ferreira (2009) para o modelo de descarregador de macrorugosidades. Devido a não ter sido possível a obtenção de alturas consideradas fidedignas a partir do 13 degrau para o descarregador de microrugosidades e do 5 degrau para o descarregador de macrorugosidades, poucas comparações são possíveis ser efetuadas. Sem surpresas conseguimos deparar com uma diferença de cerca de 60% nas velocidades. Esta diferença acusa sobretudo a presença da convergência mas sobretudo a simplificação da macrorugosidade na malha.

6
CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. ASPETOS GERAIS E CONCLUSÕES

Na dissertação apresentada foi realizada a modelação numérica de um descarregador com 26 degraus tendo em conta 2 configurações: uma com o descarregador em degraus revestido de betão e outra com a presença de rugosidade. Para o descarregador revestido em betão foram simulados 3 caudais diferentes para compreender os possíveis regimes de escoamento que podem estar presentes ao longo do seu canal. Para o descarregador com rugosidade foram simulados 2 diferentes escoamentos, apresentando o mesmo caudal mas com a presença de rugosidades diferentes, um com macrorugosidades e outro com microrugosidades.

Todas as configurações foram simuladas utilizando o modelo SST k- ω e a malha utilizada para a modelação teve por base os modelos de descarregadores em degraus presentes no Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Na tentativa de encontrar o ponto ideal entre o tempo de processamento de dados pelo *software* e a construção da malha mais próxima da realidade, não foi considerada a região de convergência do modelo do descarregador.

Foram simulados 10 segundos de escoamento para cada um dos caudais no descarregador com revestimento em betão. Para o caso do descarregador com macro rugosidades o *time-step* conseguido para simular o escoamento rondava os 5×10^{-7}s. Como consequência deste pequeno valor apenas foi possível obter dois segundos de simulação neste caso. A razão para este time-step tão pequeno assenta sobretudo na malha construída. Conclui-se que para o tempo disposto da realização desta dissertação a malha de macro rugosidades deveria ter sido efetuada de uma maneira ainda mais simplista com condições fronteiras diferentes. Para a simulação de microrugosidades foram conseguidos cinco segundos de simulação do escoamento também devido ao seu time-step rondar 2×10^{-6}s. Pelo facto dos descarregadores com rugosidade apresentarem poucos segundos de escoamento simulados, na comparação das propriedades entre diferentes rugosidades apenas foi realizada uma comparação para os momentos iniciais do escoamento.

Para todos os escoamentos foram analisados a altura, a pressão e a velocidade que apresentavam ao longo do descarregador.

A altura do escoamento foi utilizada para se obter a velocidade média e assim comparar com os ensaios laboratoriais efetuados por Ferreira (2009) e Meireles (2011). Para o descarregador em degraus revestido a betão foram comparados os caudais de 1.49 l/s e 2.49 l/s. Devido a no modelo numérico não se ter considerado a região de convergência presente no modelo físico, do degrau 1 ao degrau 13, apenas se consegue obter resultados comparativos na zona do modelo físico onde não se verifica convergência, do

degrau 13 ao degrau 26. Para o caudal de 1.49l/s existe uma discrepância dos valores numéricos e nos valores experimentais na ordem dos 40% e para o caudal de 2.49l/s esta discrepância ronda os 20%. Esta diferença elevada é justificada pelo comportamento do escoamento na zona de convergência do descarregador. Na comparação do escoamento, no descarregador com a presença de rugosidades, simulado numericamente e realizado experimentalmente não foi possível encontrar uma comparação. Conclui-se que a malha utilizada foi demasiado diferente do modelo experimental.

Na análise do estudo da velocidade foi concluído que esta tem tendência a aumentar ao longo do descarregador e também a apresentar velocidades muito pequenas nos cantos dos degraus, devido aos vórtices presentes. Estes apresentam um maior diâmetro no escoamento tipo EDT e menor no tipo EQS. Comparando com os descarregadores em degraus com rugosidades, os vórtices têm tendência a serem praticamente inexistentes ao longo dos degraus com macrorugosidade e que sejam menores nos escoamentos de microrugosidades mas com uma formação mais rápida.

A nível de pressão, tal como esperado, esta tem tendência a ser maior no início do escoamento. Cerca de 10 kPa e perto de 0 kPa no final do descarregador. Atento a essa pressão ser maior no canto dos degraus onde a recirculação do escoamento acontece. Esta fase apresenta uma importância na possibilidade de verificar a ocorrência de cavitação. Foram identificados alguns locais onde existe flutuações abruptas de pressão, estando esses pontos críticos situados sobretudo nos descarregadores que apresentam rugosidade. No entanto também foram identificados alguns pontos no escoamento com comportamento EQS sobre um descarregador em betão. Também foi possível verificar que nos descarregadores com rugosidade a pressão diminuiu mais rapidamente e de forma mais constante do que no descarregador em betão.

Pode-se concluir que de uma forma geral o trabalho permitiu a caracterização do comportamento do escoamento e do efeito da rugosidade nos descarregadores em degraus. A utilização da modelação numérica para este estudo permitiu avaliar os escoamentos de uma forma que seria bastante difícil experimentalmente.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Após o estudo desenvolvido e das conclusões acima apresentadas, surge a necessidade do autor dar continuidade aos conhecimentos conseguidos e aos avanços conseguidos.

Os estudos numéricos nos descarregadores em degraus estão a ganhar popularidade. No entanto ainda não existem suficientes estudos principalmente na modelação numérica de descarregadores de macrorugosidades. Próximos estudos que se poderão efetuar passam pela tentativa de simular numericamente um escoamento numa malha que seja mais aproximada do modelo físico. Um estudo importante a realizar seria também o do comportamento mais aprofundado de um escoamento com microrugosidades.

O *software* utilizado, apesar da sua comprovação de bons resultados e de ser bastante utilizado pela comunidade de modelação de fluídos, é pouco amigo do utilizador, não apresentando uma interface gráfica e da sua utilização ser baseado na compilação de vários ficheiros de texto. Futuros estudos comparativos do mesmo tema desta dissertação com a utilização de um diferente *software* podem ser efetuados.

O modelo de resolução RANS k-ω produz bons resultados de simulação. No entanto, seria interessante um estudo, na possibilidade de adquirir equipamentos mais poderosos a nível de processamento, de simular numericamente um escoamento num descarregador em degraus utilizado o modelo de resolução LES. Visto que com a utilização destes modelos poder-se-ia obter resultados mais detalhados.

Visto que na realização desta dissertação não foi dada muita atenção ao impacto das fronteiras rígidas no escoamento do descarregador, futuros estudos se poderão basear nesse fator e também na ação que o emulsionamento do ar e os seus vórtices provocam na dissipação de energia.

Finalmente seria importante, simular numericamente os impactos da convergência no descarregador em degraus e comparar com os resultados experimentais já obtidos.

Bibliografia

Amador, A (2005). *"Comportamiento Hidraulico de los Aliaderos Escalonados en Presas de Hormógon Compactado."* Dissertação de doutoramento, Universitá Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanha (em espanhol)

Amador, A., Sanchez-Juny, M., Dolz, J. (2006). *"Characterization of the non-aerated flow region in a stepped apillway by PIV."* Journal of Fluid Engineering, pp 1266-1273, ASME, Volume 138 Nº 6

Amador, A., Sanchez-Juny, M., Dolz, J. (2009). *"Developing flow region and pressure fluctuations on steeply sloping stepped spillways"* Journal ofHydraulic Engineering, pp 1092-1100, ASCE, Volume 135 Nº 12

Anderson, J. (1995). "Computational Fluid Dynamics - The Basics with Aplications". McGraw-Hill, Maryland.

Anderson, J. (2007). "*Fundamentals of Aerodynamics*". 4^{th} Eition., McGraw–Hill

Anderson, J.; Degrez, J.; Degroote, J.; Dick, E; Grundmann, R.; Virendeels, J. (2009) *"Computational Fluid Dynamics – An Introduction"*. Springer-Verlag, Berlin, Germany

André, M. and Ramos, P. (2003). "Hidráulica de descarregadores de cheia em degraus: Aplicação a descarregadores de paredes convergentes." Graduate Reasearch Report, IST, Lisboa, Portugal

André, S. (2004). *"High velocity aerated flows over stepped chutes with macro-roughness elements."* Dissertação de doutoramento, EPFL, Lausanne, Suiça (em inglês)

Andre, S., Boillat, J.L., Scheleiss, A.J., and Matos, J. (2004). *"Energy Dissipation and Hydrodynamic Forces of Aerated Flow over Macro-Roughness Linings for Overtopped Embankment Dams."* Proc, Intl Conf, on Hydraulics of Dams and River Strutures, Tehram, Iran, pp 189 -196, Balkema Publ., The Netherlands

Antunes, M. (2011). "Descarregadores de Cheia em canal, em betão, não convencionais." Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto, Portugal (em português)

Bakker, A. (2006). *"Applied Computational Dynamics"* Apontamentos da Disciplina de Computational Fluid Dynamics e Reacting Flows, Dartmouth College, Hanover, New Hampshire, United States of America

Bardina, J.E., Huang, P.G., Coakley, T.J. (1997), *"Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development*", NASA Technical Memorandum 110446.

Bayat, H.O. (1991). *"Stepped spillway model investigation*." Proc. 17^{th} ICOLD Congress, pp 1803-1817, Volume III Nº66, Viena, Austria

Bertin, J. J.; Periaux, J.; Ballmann, J. (1992). "*Advances in Hypersonics: Modeling hypersonic flows*" Birkhäuser, Boston, United States

Bindo, M., Gautier, J. and Lacroix, F. (1993). *"The stepped spillway of M'Bali Dam."* Journal of Water Power & Dam Const., pp 35- 36, Volume 14 Nº 1

Blasek, J. (2001). "Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications". Elsevier, Amesterdan, Netherlands

Boes, R.M. and Hager, W.H. (2003). *"Hydraulic design of stepped spillways."* Journal of Hydraulic Engineering, pp 671 -679, ASCE, Volume 129 Nº9

Cardoso, G. (2006). "Estudo do ressalto hidráulico em bacias de dissipação de energia a jusante de descarregadores de cheias em degraus." Graduate Reasearch Report, IST, Lisboa, Portugal

Cardoso, G. (2007). "Ressalto hidráulico em bacias de dissipação com acessórios a jusante de descarregadores de cheias em degraus. Estudo experimental." Dissertação de Mestrado, IST, Lisboa, Portugal

Carvalho, R. and Amador, A. (2008). "Physical and numerical investigation of the skimming flow over a stepped spillway." Proc. 3rd IAHR Int. Symposium on Hydraulic Strutures, pp 1767 – 1772, Nanjing, China,

Celik, I. B. (1999). *"Introductory Turbulence Modeling"* Lectures Notes, West Virginia University, United States

Chamani, M.R. and Rajaratnam, N. (1999). *"Characteristics of skimming flow over stepped spillways."* Journal of Hydraulic Engineering, pp 361 – 368, ASCE, Volume 125 Nº4

Chanson, H (1994a) *"Hydraulics of a Nappe Flow Regime Above Stepped Chutes and Spillways."* Australian Civil Engineering Transactions, pp 69- 76, IEAust, Volume CE36 No.1

Chanson, H. (1994b) "Comparation of energy dissipation in nappe and skimming flow regimes on stepped chutes." Journal of Hydraulic Research pp 213 – 218, Volume 32 Nº2

Chanson, H. (1995) "Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channels, Weirs and Spillways." Pergamon, Oxford, Reino Unido

Chanson, H. (2002). "The hydraulics of stepped chutes and spillways." Balkema, Lisse, Holanda

Chanson, H. and Toombes, L. (2002a). "Experimental investigation o fair entrainment in transition and skimming flows down a stepped chute" Canadian Journaul of Civil Engineering, 29, pp 145 -156

Chanson, H. and Toombes, L. (2002b). *"Air water flows down stepped chutes: turbulence and flow struture observations."* International Journal of Multiphase Flow, 28, pp 1737 – 1761

Chanson, H. and Toombes, L. (2004). *"Hydraulics of stepped chutes: The transition flow."* Journal of Hydraulic Research, pp 43 – 54, IAHR, Volume 42 Nº1

CHINCOLD (2010), http://www.chincold.org.cn/dams/MilestoneProject/webinfo/2010/4/1281577326086123.htm, Março 2014

Chinnarasri, C., Donjadee, S. and Israngkura, U. (2008). *"Hydraulic characteristics of gabion-stepped weirs."* Journal of Hydraulic Engineering, pp 1147 -1152, Volume 134 Nº8, ASCE

Chen, Q., Dai, G. and Liu, H. (2002). *"Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow."* Journal of Hydraulic Engineering, pp 683 -688, Volume 128 Nº 7, ASCE

Cheng, X., Luo, L. and Zhao, W. (2004a). *"Study of aertion in the water flow over stepped spillway."* Proc. World Water Congress 2004, ASCE, Salt Lake City, Utah, Estados Unidos

Cheng, X., Luo, L. and Li, R. (2004b). *"Two-phase flow simulation of aeration on stepped spillway."* Progress in Natural Science, pp 626-630, Volume 14 Nº7

Dai Prá, M. (2004). *"Características de Escoamentos sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:1H."* Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (Brasil).

Decreto-Lei nº409/93. D.R.I Série A, 209 (1993-12-14) p.6944 - 6945

Decreto-Lei nº344/2007. D.R. 1º Série, 198 (2007-11-15) p. 7463

Deardorff, J. (1970). *"A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers"*. Journal of Fluid Mechanics Livro 41 (2): pp 453–480.

Elviro, G. and Mateos, I. (1995). *"Spanish reasearch in stepped spillways."* Int. J. Hydropower & Dams, pp 61 -65, Volume 2 Nº5

Engys Lta (2012). *"A Comprehensive Tour of snappyHexMesh"*, 7th OpenFOAM workshop, 25 Junho 2012

Essery, I. T. S. and Horner, M. W., (1978). *"The hydraulic design of stepped spillways."* CIRIA, 33, 2nd edition, London, UK

Eymard, R., Gallouet, T., Herbin, R. (2003). "Finite Volume Methods". Handbook of Numecil Analysis, P.G. Ciarlet, J.L. Lions editions, volume 7, pp 713 - 1020

Fael, C. (2000). *"Escoamento em quedas sucessivas: Ocorrência e dissipação de energia."* Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal (em português)

Fael, C.M.S. and Pinheiro, A.N. (2003). *"Escoamentos em quedas sucessivas. Condições de ocorrência e energia residual."* Recursos Hidricos, pp 39 -50, Volume 24, Nº1 (em português)

Felder, S. e Chanson H. (2009). "Energy dissipation, flow resistance and gas liquid interfacial área in skimming flows on moderate-slope stepped spillways." Environmental Fluid Mechanics, pp 427 – 441, Volume 9 Nº4

Ferreira, R. (2009). *"Concepção e Projecto de um Descarregador em Degraus Escavado em Rocha".* Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto, Portugal (em Português)

Figueiredo, N. (2010). *"Dissipação de energia a jusante de um descarregador não convencional."* Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto, Portugal (em português)

Ferziger, J. H.; Peric, M. (2002) "*Computational Methods for Fluid Dynamics"*, 3rd Edition. Springer, Berlim

Gacek, J. (2007). *"Numerical Simulation of flow through a spillway and diversion struture."* Dissertação de Mestrado, MacGill University, Montreal, Canadá

George, W. (2013). *"Lectures in Turbulence for the 21st Century".* www.turbulence-online.com

Gonçalves, N. (2007). "*Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas".* Dissertação de Mestrado, FCUP, Porto, Portugal (em Português)

Gonzalez, C. (2005). *"Na experimental study of free-surface aeration on embankment stepped chutes."* Dissertação de doutoramento, University of Queensland, Brisbane, Australia

Gonzalez, C.A, Takahashi, M. and Chanson, H., (2005). *"Effects of a Step Roughness in Skimming Flows: na Experimental Study."* Research Report Nº, CE160, Dept of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia

Gonzales, C.A., Chanson, H. (2005). "*Experimental study of Turbulence Manipulation in Stepped Spillways. Implications on flow resistence in skimming Flows."* Proc: 31th IAHR Congress, Seoul, Korea.

Gonzalez, C.A and Chanson, H., (2006). *"Air Entrainment and Energy Dissipation on Embankment Spillways."* International Symposium on Hydraulic Strutures, October 2006, Ciudad Guayana, Venezuela.

Gonzalez, C.A and Chanson, H., (2007). *“Hydraulic Design of Stepped Spillways and Downstream Energy Dissipators for Embankment Dams.”* Dam Engineering, pp 223 -244, Volume 17, A.A.A Rodrigue, Sutton, England

Gutknecht, M and Nachtigal, N.M. (1993), *“An Implementation of the Look-Ahead Lanczos Algorithm for Non-Hermitian Matrices”*, SIAM, Journal of Scientific Statistical Computing, Edition **14 Volume 1**, pp 137-158.

Hamani, M.R. and Rajaratnam, N. (1999). *“Characteristics of skimming flow over stepped spillways.”* Journal of Hydraulic Engineering, pp 361 – 368, ASCE, Volume 124 Nº4

ICOLD, (1994). *New concepts in spillway design*. Boletim para o Subcomité nº1 do Comité de Hidráulica de Barragens do International Comissiono n Large Dams, Setembro 1994, ICOLD

INAG (2014), http://cnpgb.inag.pt/gr_barragens/gbportugal/Picote.htm, Março de 2014

Kells, J.A (1995). *“Comparation of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes in stepped chutes: discussion.”* Journal of Hydraulic Reasearch, pp 128 -133, Volume 33 Nº1, IAHR

Khdhiri, H., Potier, O. And Leclerc, J.P (2014). *“Aeration efficiency over stepped cascades: Better predictions from flow regimes.”* Water Reasearch 55, pp 194 -202, Nancy, França

Knauss, J. (1995) *“ThΣ ΓPIAΣ TO ΠHΔHMA der Altweibersprung. Die Rätselhafte Alte Talsperre in der Glosses-Schlucht bei Alyyzeia in Akarnanien”.* Archäologischer Anzeiger, Heft 5, pp 138 -162 (em alemão)

Kolditz, O. (2001) *“Computational Methods in Environmental Fluid Mechanics”* Springer-Verlag

Kositgittiwong, D.; Chinnarasri, C. and Julien, P.Y. (2013). *“Numerical simulation of flow velocity profiles along a stepped spillway”*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering pp 227 – 327, SAGE Publications

Launder, B. E.;and Spalding, D. B. (1974) “*The numerical computation of turbulent flows*”, Comp. Meth. Appl. Mech. Energy, Vol. 3, pp. 269-289

Lobosco, R.J., Schulz, H.E. and Simões, A.L.A. (2011). *“Analysis of Two Phase Flows on Stepped Spillways.”* Hydrodynamics – Optimizing Methods ans Tools, pp 285 -308, Prof. Harry Schulz (Ed.) InTech

Menter, F.R. (1993) “*Zonal two equation k-w turbulence models for aerodynamic flows.*” 24th Fluid Dynamics Conference, Florida, USA, 6–9 July 1993, Paper No. AIAA 93-2906

Matos (1999). *“Emulsionamento de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus.”* Dissertação de Doutoramento, IST, Portugal (em português)

Matos, J. and Quintela, A., (1997). *“Escoamento em quedas sucessivas em descarregadores em degraus. Dissipação de energia.”* Simpósio sobre Aproveitamentos Hidroelétricos, APRH, Lisboa, Portugal (em português)

Meireles, M. (2004). *“Caracterização do escoamento deslizante sobre turbilhões e energia específica residual em descarregadores de cheias em degraus.”* Dissertação de Mestrado, IST, Lisboa, Portugal (em português)

Meireles, I., Matos, J. and Melo, J.F. (2006). *“Skimming flow properties upstream o fair entrainment inception on steeply sloping stepped chutes.”* Proc. Intl Symposium on Hydraulic Strutures, IAHR, Ciudad Guayana, Venezuela

Meireles, I.O.C. (2011). *"Hydraulics of stepped chutes: experimental-numerical-theoretical study."* Dissertação de Doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal (em inglês)

Moin, P. and Kim, J. (1997). "*Tackling Turbulence with Supercomputers"*, Sci. Am.,Vol. 276, No. 1, pp. 62–68.

Moin, P. and Mahesh, K. (1998). *"Direct Numerical Simulation: A Tool in Turbulence Research",* Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 30, pp. 539–578.

Munson, B.R; Young, D.F.; Okiishi, T.H.; Huebsch, W. W. (2010) *"Fundamental of Fluid Mechanics"*. John Wiley & Sons

Cao, N (2010). *"Effects of turbulence intensity and integral lengthscale on an asymmetric airfoil at low Reynolds numbers."* Dissertação de Mestrado, Ontario, Canada

Ohtsu, I. and Yasuda, Y. (1997a). *"Caracteristics of flow conditions on stepped channels."* Proc: 27th IAHR Congress, San Francisco, USA

Ohtsu, I. and Yasuda, Y. (1997b). *"Caracteristics of flow conditions on stepped channels."* Notes of the presentation to the 27th IAHR Congress, San Francisco, USA

Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Takahashi, M. (2004). *"Flow Characteristics of Skimming Flows in Stepped Channels."* Journal of Hydraulic Engineering, pp 860-869, ASCE, Volume 130, Nº.9

OpenFOAM Foundation (2014) *"OpenFOAM User Guide"*

Paraview (2012).
http://www.paraview.org/Wiki/index.php?title=ParaView/Users_Guide/VTK_Data_Model, June 2012

Peyras, L., Royet, P. and Degoutte, G., (1991). *"Ecoulement et dissipation sur les déservoirs en gradin de gabions."* La Houille Blanche, 1, pp 37-47 (em francês)

Pinheiro, A.N., (2007). *"Descarregadores de Cheias em Canal de Encosta"*. IST, Lisboa

Pinto, L. C. (2008). *"Análise por Simulação Numérica do Desprendimento de Vórtices de um Cilindro Circular em Movimento Forçado."* Dissertação submetida ao Programa Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. (em português)

Piomelli, U. (2004). *"Large-eddy and direct simulation of turbulent flows. Lectures series on Introduction to Turbulence Modeling"*. von Karman Institute for Fluid Dynamics.

Pope, S. (2000). "*Turbulent Flows"*. Cambridge University Press

Proença, M.F. and Carvalho, Elsa (2012). *"Aproveitamentos Hidráulicos: Aulas práticas"* Apontamentos da disciplina de Aproveitamentos Hidraulicos e Obras Fluviais I, FEUP, Porto (em português)

Quintela, A.C., (1990). *Apontamentos da disciplina de Estruturas Hidráulicas*. IST, Lisboa (em português)

Rajaratnam, N. (1990). "*Skimming flow in stepped spillways."* Journal of Hydraulic Engineering, pp 587 -591, ASCE, Volume 116 Nº4

Relvas, A.T e Pinheiro, A.N. (1998). "*Descarregadores de Cheias Não Convencionais Sobre Barragens de Aterro*." 4º Congresso da Água, 23 a 27 de Março de 1998, Lisboa, APRH (em português)

Relvas, A.T e Pinheiro, A.N. (2008). "*Inception point anda ir concentration in flows on stepped chutes lined with wedge-shaped concrete blocks.* " Journal of Hydraulic Engineering, pp 1042 – 1051, ASCE, Volume 134 Nº8

Renna, F. (2004). *"Caratterizzazione fenomenológica del moto di un fluido bifásico lungo scaricatori a gradini."* Dissertação de doutoramento, Politecnico di Bari, Cosenza, Itália (em italiano)

Rice, C.E., and Kadavy, K.C., (1996). *"Model Study of a Roller Compacted Concret Stepped Spillway."* Journal oh Hidraulic Engeneering, ASCE, Vol. 122, No.6, June.

Rodi, W. (1984). *"Turbulence models and their application in hydraulics – A state-of-art review"* - .Institut für Hydromechanik, Unisersity of Karlshruhe, Karlshure

Roushangar, K., Akhgar, S., Salsami, F. and Shiri, J. (2013*). "Modeling energy dissipation over stepped spillway using machine learning approaches."* Journal of Hydrology, pp 254 -265, Volume 508, CrossMark

Salmasi, F., Chamani, M.R. and Zadeh, D.F. (2012). *"Experimental Study of Energy Dissipation over Stepped Gabion Spillways with Low Heights"* Transactions of Civil Engineering, pp 253 -264, Shiraz University, Republic of Iran

Sanagiotto, D. (2003)*. "Características do Escoamento sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:0.75H."* Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (em português do Brasil)

Silveira-Neto, A. (1991). *"Simulation Numérique des Grandes Echelles d'un Ecoulment Turbulent Decollé en aval d'une Marche"*. Dissertação de Dourotamento, Institut National Polytechnique de Grenoble (em francês)

Smagorinsky, J. (1963) "General Circulation Experiments With the Primitive Equations: I. The basic Experiment". Monthly Weather Review.

Sorensen, R.M. (1985). *"Stepped spillway hydraulic model investigation."* Journal of Hydraulic Engineering, pp 1461 – 1472, ASCE, Volume 111 Nº12

Sousa, P. (2011). "Estudo da dissipação de energia por ressalto hidráulico a jusante de descarregadores não convencionais." Dissertação de mestrado, FEUP, Porto, Portugal (em português)

Steffler, P.M. and Jin, Y. (1993). *"Depth Avaraged and Moment Equations for a Moderately Shallow Flow."* Journal of Hydraulic Research, pp 5- 17, Volume 31 Nº1

Stephenson, D. (1991). *"Energy dissipation down stepped spillways."* Journal of Water Power & Dam construction, pp 27-30, Volume 43 Nº9, September 1991

Surana, K.A., Allu, S., Tenpas, P. W. and Reddy, J.N. (2007). "K-Version of Finite Element Method in Gas Dynamics: Higher-Order Global Differentiability Numerical Solutions". International Journal for Numerical Methods in Engineering, Volume 69 (6), pp 1109 -1157

Tabbara, M., Chatila, J. and Awwad, R. (2005). *"Computational simulation of flow over stepped spillways."* Computers and Strutures, pp 2215 – 2224, Volume 83, Lebanese American University, Libano

Tennekes, H. Lumley, J. L. (1972) "*A First Course in Turbulence"*. MIT Press, Massachusetts

Tozzi, M.J. (1992). *"Caracterização/Comportamento de Escoamentos em Vertedouros com Paramentos em Degraus."* Dissertação de Doutoramento, Universidade de São Paulo, São Paulo (em português do Brasil)

Tozzi, M.J. (1994). *"Residual energy in stepped spillways."* Journal of Water Power and Dam Construction, pp 32 -34

TU Delft (2000) http://ta.twi.tudelft.nl/users/wesselin/projects/unstructured.html

Unami, K., Kawachi, T., Munit Babar, M. and Itagaki, H. (1999). *"Two-Dimensional Numerical Modelo f Spillway Flow."* Journal of Hydraulic Engineering, pp 369-375, Volume 125 Nº4

Versteeg, H.K., Malalasekera, W. (2007). *"An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method.* Pearson Education Limited, Harlow, England

Wendt, J. F. (2009). "*Computational Fluid Dynamics*." Springer, Berlin, 2009.

Wilcox, D. C. (1988). "Reassessment of the Scale-determining Equation for Advanced Turbulence Models" AIAA Journal, Vol. 26, No. 11, pp. 1299–1310.

Wilcox, D. C. (1998). "Turbulence Modeling for CFD". 2nd edition, Anaheim DCW Indutries

Yasuda, Y. and Chanson, H., (2003). *"Micro and macro-scopic study of two-phase flow on a stepped chute."* Proc. 30th IAHR Intl Congress, pp 695 -702, Thessaloniki, Grécia.

Yasuda, Y. and Ohtsu, I., (2003). *"Effect of step cavity área on flow characteristics of skimming flows on stepped chutes."* Proc. 30th IAHR Intl Congress, pp 703 -710, Thessaloniki, Grécia.

Yasuda, Y., Takahashi, M. and Ohtsu, I. (2001). "*Energy dissipation of skimming flows on stepped-channel chutes."* Proc. 29th IAHR Congress, Theme D, Beijing, China

Young, M.F. (1982). *"Feasibility study of a stepped spillway."* Hydraulics Division Speciality Conference, pp 96 -106, ASCE, Nova Iorque, Estados Unidos